

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada:
prof. dr. sc. Zoran Kožuh

Dino Branilović

Zagreb, 2011.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Dino Branilović

Zagreb, 2011.

SAŽETAK

U radu je opisan TIG postupak zavarivanja i zaštitni plinovi koji se koriste prilikom zavarivanja. Opisani su parametri koji su važni da bi se pravilno izveo zavar, te je u kratkim crtama opisano programiranje robota.

Nakon obrade teoretskog dijela, izveden je eksperimentalni dio u Laboratoriju katedre za zavarene konstrukcije (Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb).

U eksperimentalnom dijelu je ispitivan utjecaj četiri vrste zaštitnih plinova kod TIG zavarivanja visokolegiranog austenitnog Cr-Ni čelika na geometrijske značajke zavora.

ZAHVALA

Zahvaljujem se svima koji su mi pomogli u pripremi ovog rada: voditelju rada prof.dr.sc. Zoranu Kožuhu, dr.sc. Ivici Garašiću, mag.ing.mech Maji Remenar te laborantima laboratorija za zavarivanje: g. Batinčiću, g. Šokičiću i g. Sukobljeviću.

Hvala

IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio potpuno samostalno na temelju znanja koje sam stekao tijekom dosadašnjeg školovanja i prikupljene literature.

Dino Branilović

SADRŽAJ

1. Uvod.....	1
2. Teorijski dio.....	2
2.1. Električni luk.....	2
2.2. Utjecaj vrste struje zavarivanja i polariteta elektrode na karakteristike TIG zavarivanja.....	4
2.3. Vrste TIG zavarivanja prema stupnju automatizacije.....	11
2.4. Oprema za TIG zavarivanje.....	14
2.5. Zaštitni plinovi.....	25
2.5.1. Funkcija plinske zaštite korijenskog zavara.....	30
2.6. Parametri zavarivanja.....	33
2.7. Položaji zavarivanja i vrste spojeva.....	39
2.8. Greške u zavarenom spoju	42
2.9. Cr-Ni čelik	44
3. Eksperimentalni dio.....	49
3.1. Izrada programa za robotizirano zavarivanje.....	51
3.2. Navarivanje ploča.....	55
3.3. Izrada i analiza makroizbrusaka.....	61
3.4. Analiza dobivenih rezultata.....	65
4. Zaključak.....	70
5. Literatura.....	71

POPIS SLIKA

Slika 1. Princip procesa u električnom luku kod TIG zavarivanja [2].....	3
Slika 2. Izmjenična i istosmjerna struja [4]	5
Slika 3. Usporedba tri vrste valova izmjenične struje [4]	6
Slika 4. „Ispravljanje luka“ pod povećalom osciloskopa [4]	7
Slika 5. Usporedba utjecaja frekvencije na dubinu i širinu penetracije prilikom zavarivanja [4]	8
Slika 6. Oblici impulsa istosmjerne pulsirajuće struje [4]	9
Slika 7. Ručno TIG zavarivanje [4]	11
Slika 8. Pištolj za poluautomatizirano TIG zavarivanje [5]	12
Slika 9. Robotska stanica za TIG zavarivanje VRC-1G MIG + 1G TIG/1dm [6]	13
Slika 10. Oprema za ručno TIG zavarivanje [7]	14
Slika 11. Strma karakteristika izvora struje kod TIG zavarivanja [4]	15
Slika 12. Izvor struje za TIG zavarivanje [8]	16
Slika 13. Pištolj za TIG zavarivanje [9]	17
Slika 14. Najčešće korištene izvedbe sapnica [10]	18
Slika 15. Nestabilan i stabilan protok zaštitnog plina [11]	19
Slika 16. Boce za zaštitni plin	20
Slika 17. Oblik vrha elektrode i veličina zagrijanosti vrha u ovisnosti o vrsti struje (jednaka jakost struje u sva tri slučaja) [13]	22
Slika 18. Loša i dobra priprema volframove elektrode [4]	23
Slika 19. Električni luk nakon brušenja elektrode [10]	23
Slika 20. Oblik električnog luka i izgled zavora prilikom zavarivanja zaštitnim plinom argonom, odnosno helijem [4]	29
Slika 21. Veza napona i struje električnog luka u odnosu na zaštitne plinove argon i helij [3].....	30
Slika 22. Zaštita korijena zavora u obliku kućišta [3]	31
Slika 23. Zaštita korijena zavora kod zavarivanja spoja cijevi [3]	32
Slika 24. Položaj pištolja i dodatnog materijala kod ručnog TIG zavarivanja [2]	37
Slika 25. Prikaz tehnike rada u dodavanju žice u talinu kod ručnog TIG zavarivanja [2]	38
Slika 26. Horizontalni položaji zavora [16]	39
Slika 27. Horizontalno – vertikalni položaji zavora [16]	40
Slika 28. Vertikalni položaji zavora [16]	40
Slika 29. Nadglavni položaji zavora [16]	41

Slika 30. Prikaz mehanizma samoobnavljanja pasivnog filma kromovih oksida na površini [18]	44
Slika 31. Karakteristične mikrostrukture pojedinih grupa Cr-Ni čelika [18]	45
Slika 32. Robotska stanica VRC-1G MIG + 1G TIG/1dm [6].....	49
Slika 33. Uređaj za automatizirano TIG zavarivanje Bug-o.....	50
Slika 34. Program za navarivanje sa standardnim opcijama.....	51
Slika 35. Program za navarivanje s dodatnim opcijama.....	52
Slika 36. Biranje parametara za zavarivanje.....	53
Slika 37. Biranje parametara za zavarivanje (stranica 2.)	54
Slika 38. Plazma rezač Vanad.....	61
Slika 39. Utjecaj vrste zaštitnog plina na penetraciju pri navarivanju kontinuiranim strujama.....	65
Slika 40. Utjecaj vrste zaštitnog plina na širinu navara pri navarivanju kontinuiranim strujama.....	66
Slika 41. Utjecaj vrste zaštitnog plina na penetraciju pri navarivanju impulsnim strujama.....	66
Slika 42. Utjecaj vrste zaštitnog plina na širinu navara pri navarivanju impulsnim strujama.....	67
Slika 43. Utjecaj vrste zaštitnog plina na napon pri navarivanju kontinuiranim strujama.....	68
Slika 44. Utjecaj vrste zaštitnog plina na napon pri navarivanju impulsnim strujama...	69

POPIS TABLICA

Tablica 1. Neke od karakteristika TIG zavarivanja ovisno o vrsti struje i polaritetu [3]	4
Tablica 2. Odabir volframovih elektroda prema vrsti osnovnog materijala i struji [12].	21
Tablica 3. Orijentacijski podaci za TIG zavarivanje nehrđajućih čelika [14].	33
Tablica 4. Primjeri k koeficijenata za različite vrste elektroda [12]	35
Tablica 5. Preporučeni zaštitni plinovi prilikom zavarivanja pojedinih metala [11].	36
Tablica 6. Dimenzije ploča koje su korištene u ispitivanju.	55
Tablica 7. Objašnjenja oznaka ploča.	56
Tablica 8. Ploča K1, parametri TIG navarivanja, te izgled navara.	57
Tablica 9. Ploča I1, parametri TIG navarivanja, te izgled navara.	57
Tablica 10. Ploča K2, parametri TIG navarivanja, te izgled navara.	58
Tablica 11. Ploča I2, parametri TIG navarivanja, te izgled navara.	58
Tablica 12. Ploča K3, parametri TIG navarivanja, te izgled navara.	59
Tablica 13. Ploča I3, parametri TIG navarivanja, te izgled navara.	59
Tablica 14. Ploča K4, parametri TIG navarivanja, te izgled navara.	60
Tablica 15. Ploča I4, parametri TIG navarivanja, te izgled navara.	60
Tablica 16. Makroizbrusci navarivani kontinuiranom strujom, jakosti struje 50 A.	62
Tablica 17. Makroizbrusci navarivani kontinuiranom strujom, jakosti struje 90 A.	62
Tablica 18. Makroizbrusci navarivani kontinuiranom strujom, jakosti struje 130 A.	63
Tablica 19. Makroizbrusci navarivani impulsnom strujom, jakosti struje 50 A.	63
Tablica 20. Makroizbrusci navarivani impulsnom strujom, jakosti struje 90 A.	64
Tablica 21. Makroizbrusci navarivani impulsnom strujom, jakosti struje 130 A.	64
Tablica 22. Utjecaj vrste plina na napon pri pojedinoj jakosti kontinuirane struje.	68
Tablica 23. Utjecaj vrste plina na napon pri pojedinoj jakosti impulsne struje.	69

POPIS OZNAKA

I	Jakost struje (A)
Ø elektrode	Promjer elektrode (mm)
k	Koeficijent opterećenja jakosti struje zavarivanja
Ar	Argon
H₂	Vodik
He	Helij
N	Dušik
Cr-Ni čelik	Krom – nikal čelik
Cr	Krom
C	Ugljik
Mo	Molibden
V	Vanadij
Ti	Titan
Al	Aluminij
Si	Silicij
Nb	Niobij
U	Napon (V)
v_z	Brzina zavarivanja (cm/min)
Q	Protok zaštitnog plina (l/min)
f	Frekvencija (Hz)

1. Uvod

TIG zavarivanje, tj. zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi plinova je postupak zavarivanja taljenjem kod kojeg se energija potrebna za zavarivanje dovodi kroz električni luk koji se održava između radnog komada i netaljive elektrode. [1]

Zavarivati se može sa i bez dodatnog materijala. Zaštitna atmosfera oko taline i zagrijanog vrha elektrode osigurana je inertnim plinovima.

TIG je skraćenica, koja na engleskom jeziku znači Tungsten inert gas. Tungsten je engleski naziv za volfram, a to opisuje netaljivu elektrodu koja je od volframa (može biti legirana i s nekim drugim metalima, o kojima će biti riječi kasnije). Inertni ili neaktivni plin je argon, ili helij, a također postoje i njihove mješavine u raznim omjerima (ponekad i s nekim drugim plinovima), ovisno o uvjetima zavarivanja.

TIG zavarivanje se razvilo iz postupka elektrolučnog zavarivanja ugljenom elektrodom koji se već prije upotrebljavao, a potječe iz 1941. godine. Najprije se upotrebljavao u avionskoj industriji pri zavarivanju lakih metala, da bi se kasnije proširio na razne druge grane industrije, prvenstveno tamo gdje se zavaruju nehrđajući čelici, bakar i aluminij. [1]

Prednosti TIG zavarivanja: [1]

- primjenjiv je za zavarivanje svih metala
- primjenjiv je za sve oblike i položaje radnog komada
- nema rasprskavanja kapljica metala
- nema čišćenja troske
- nema dima i štetnih plinova
- ako je zavareni spoj izveden ispravno, tada spada u najkvalitetniji zavareni spoj
- zavar je vrlo čist, gladak i lijep

Nedostaci TIG zavarivanja: [1]

- neekonomičnost u zavarivanju debljih materijala
- otežan rad na otvorenom kod većih strujanja zraka
- cijena zaštitnog plina
- zahtjeva veliku točnost i čistoću u pripremi spoja

2. Teorijski dio

2.1. Električni luk

Električni luk je trajno i snažno električno pražnjenje u plinu, na prostoru između vrha volframove elektrode i mjesta zavarivanja u strujnom krugu. Pri tome se električna energija pretvara u toplinsku uz visoke temperature, tako da se tali metal radnog komada i dodatni materijal, a volframova elektroda se ne tali. [2]

Uspostavljanje električnog luka se vrši sa i bez dodira volframove elektrode s radnim komadom: [2]

1. Uspostavljanje električnog luka sa dodiranjem volframove elektrode s radnim komadom

Upotrebljava se kod uređaja za zavarivanje istosmjernom strujom koji nemaju u sebi ugrađen uređaj visokofrekventne električne struje.

Provodi se laganim povlačenjem vrha elektrode po površini radnog komada. Nakon što se vrh elektrode dotakne s radnim komadom zatvori se strujni krug i poteče električna struja, te se odmicanjem vrha elektrode od radnog komada uspostavi električni luk kroz ionizirani zaštitni plin.

2. Uspostavljanje električnog luka bez dodira volframove elektrode s radnim komadom

Uglavnom se koristi ovaj način uspostave električnog luka, i to uz pomoć visokofrekventne električne struje.

Vrh elektrode se prinese blizu površine radnog komada (na oko Ø elektrode), te visokonaponska, visokofrekventna struja „preskoči“ razmak između vrha elektrode i radnog komada u vidu izboja iskri i tako stvori električni luk.

Kod uspostavljanja i održavanja električnog luka glavni nosilac ionizacije je zaštitni plin.

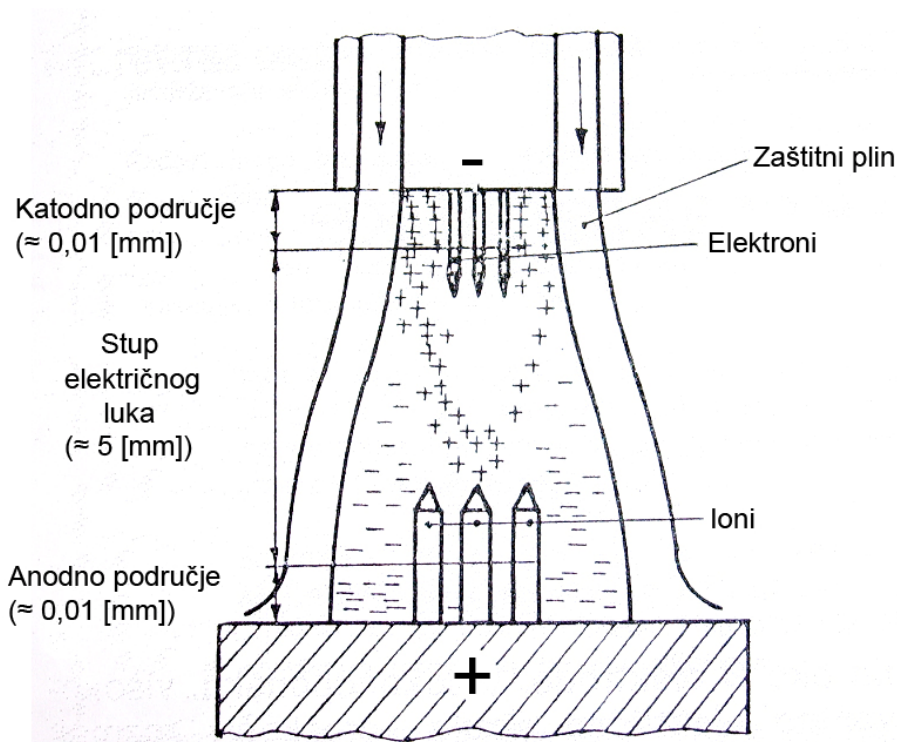
Električni luk kod TIG zavarivanja sastoji se iz anodnog i katodnog područja, te područja stupa električnog luka: [2]

1. Anodno područje električnog luka ili područje plus pola je ispred anode. Male je veličine ($\approx 0,01$ mm), a sastoji se od oblaka elektrona koji velikom brzinom udaraju na anodu i tu oslobađaju svoju energiju, pri čemu se razvija toplina na anodi (2000 – 5000 K) pri čemu se tali metal.
2. Katodno područje električnog luka ili područje minus pola nalazi se ispred katode. Također je male veličine ($\approx 0,01$ mm), a sastoji se od oblaka iona koji su privučeni

katodom i koji velikom brzinom udaraju na površinu katode, pri čemu se također razvija toplina (manja nego na anodi).

3. Stup električnog luka je najduže područje (3 – 5 mm), ovisno o naponu električnog luka, a nalazi se između anodnog i katodnog područja. Sastoji se od mješavine elektrona, iona, neutralnih atoma i molekula. Uslijed privlačnih sila katode i anode kroz područje stupa električnog luka prolaze elektroni i ioni, te se tako održava električni luk.

Slika 1. prikazuje princip procesa u električnom luku kod TIG zavarivanja. [2]



Slika 1. Princip procesa u električnom luku kod TIG zavarivanja [2]

Dužina električnog luka iznosi približno onoliko koliki je promjer volframove elektrode, tamo gdje je vrh elektrode zaobljen. Gdje je vrh elektrode zašiljen dužina električnog luka je manja. Temperatura električnog luka ovisi o parametrima zavarivanja, vrsti zaštitnog plina, te vrsti metala koji se zavaruje. Kreće se između 2000 do 5000 K, a u samoj osi plazme temperatura dostiže vrijednosti između 10000 do 30000 K. [2]

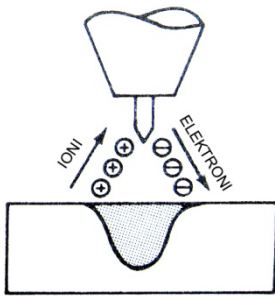
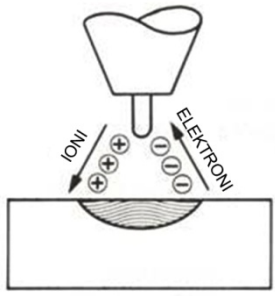
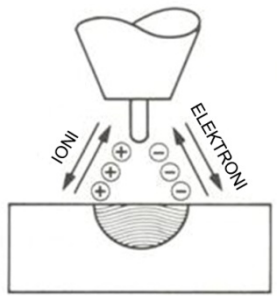
2.2. Utjecaj vrste struje zavarivanja i polariteta elektrode na karakteristike TIG zavarivanja

Raspodjela topline električnog luka kod TIG zavarivanja ovisi o vrsti struje u električnom luku (i polaritetu elektrode), pa se razlikuju tri slučaja:

1. Istosmjerna struja, elektroda na negativnom polu
2. Istosmjerna struja, elektroda na pozitivnom polu
3. Izmjenična struja

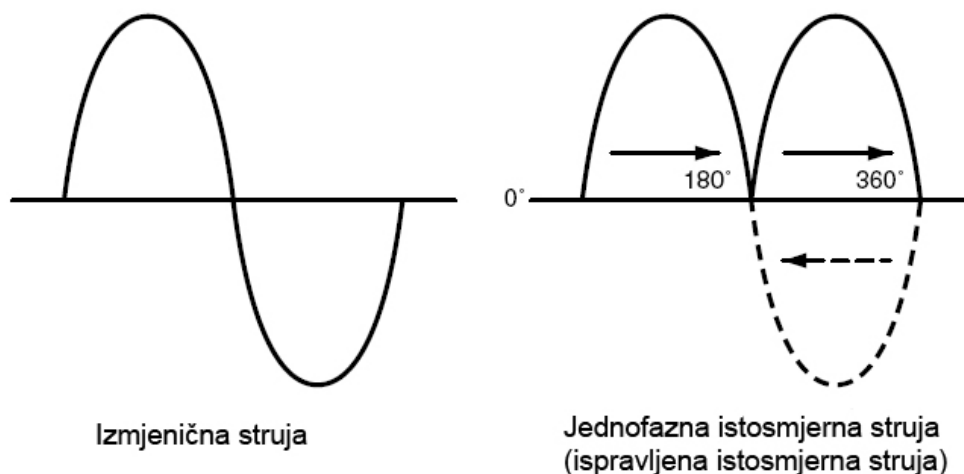
Tablica 1. Prikazuje neke od karakteristika TIG zavarivanja ovisno o vrsti struje i polaritetu. [3]

Tablica 1. Neke od karakteristika TIG zavarivanja ovisno o vrsti struje i polaritetu [3]

Vrsta struje	DC	DC	AC
Polaritet elektrode	Negativan	Pozitivan	
Tok elektrona i iona			
Čišćenje oksida	Ne	Da	Da- svakih pola ciklusa jedan puta
Raspodjela topline između elektrode i radnog komada	70 % na radnom komadu 30 % na kraju elektrode	30 % na radnom komadu 70 % na kraju elektrode	50 % na radnom komadu 50 % na kraju elektrode
Penetracija	Duboka; uska	Plitka; široka	Srednja
Kapacitet elektrode	Odličan npr. elektroda Ø 3,2 mm – 400 A	Mali npr. elektroda Ø 6,4 mm – 120 A	Dobar npr. elektroda Ø 3,2 mm – 255 A

Istosmjerna struja, elektroda na negativnom polu

Istosmjerna struja je struja čiji tok elektrona ne mijenja smjer u vremenu. Postoje izvori struje za zavarivanje koji mogu izmjeničnu struju pretvoriti u istosmjernu struju, prema slici 2.



Slika 2. Izmjenična i istosmjerna struja [4]

Prilikom zavarivanja istosmjernom električnom strujom elektrodom na minus polu elektroni teku od negativne elektrode na pozitivni radni komad, a pozitivni ioni teku prema negativnoj elektrodi. Budući da elektroni imaju veću sveukupnu kinetičku energiju od iona, brže se zagrijava mjesto zavarivanja na radnom komadu, a manje vrh elektrode, pa je samim time moguće veće strojno opterećenje elektrode.

Za istu jakost struje zavarivanja (elektroda priključena na minus pol) može se primijeniti oko tri puta manji promjer elektrode, nego kada bi elektroda bila priključena na plus pol. [2]

Budući da se vrh elektrode jako ne zagrijava može ostati zašiljen, čime se dobiva koncentrirani električni luk koji utječe na dublje protaljivanje, a luk je također stabilniji, naročito kod malih jakosti struje zavarivanja. [2]

Istosmjerna struja, elektroda na pozitivnom polu

Prilikom zavarivanja elektroni teku prema vrhu pozitivne elektrode i jako je zagrijavaju, pa je potreban veći promjer elektrode. Budući da dolazi do „izbijanja“ elektrona iz površine radnog komada, što uzrokuje razaranje površinskih oksida na aluminiju, moguće je zavarivanje aluminija i ostalih lakih metala na ovaj način, uz primjenu elektrode većeg promjera.

Međutim, kada je veći promjer elektrode, a mala jakost struje zavarivanja, dolazi do smanjenja stabilnosti električnog luka, te njegovog nesmetanog „šetanja“ po zaobljenom dijelu elektrode, što dakako smanjuje razaranje oksida, te dubinu protaljivanja (pozitivni

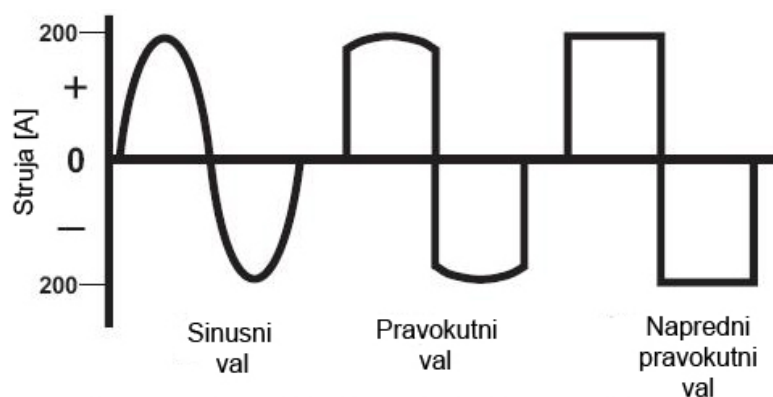
elektroni koji teku od elektrode prema radnom komadu imaju znatno manju energiju, što također smanjuje dubinu protaljivanja). [2]

Izmjenična struja

Izmjenična struja je struja čiji tok elektrona mijenja smjer (pozitivan i negativan) u vremenu. Cilj je postići što bržu promjenu struje, da se dobije što veća iskoristivost uređaja za zavarivanje, budući da struja teče u valovima, tj. titra, a na vrhovima je najveća struja, te se želi postići što duže zadržavanje na tim vrhovima.

Slika 3. Prikazuje tri vrste valova izmjenične struje: [4]

- I. Sinusni valovi izmjenične struje – mala iskoristivost uređaja za zavarivanje
- II. Pravokutni valovi izmjenične struje – veće zadržavanje maksimalne struje, te postizanje veće iskoristivosti uređaja za zavarivanje
- III. Napredni pravokutni valovi izmjenične struje – najveća iskoristivost uređaja za zavarivanje



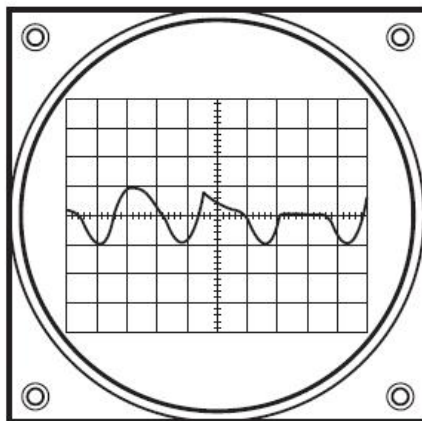
Slika 3. Usporedba tri vrste valova izmjenične struje [4]

U teoriji su polovine ciklusa jednake po intenzitetu, razlika je samo u polovima, međutim, u praksi je situacija malo drugačija.

Osciloskopom su dobiveni rezultati (slika 4.) koji pokazuju da je pozitivni dio ciklusa izmjenične struje sinusnog vala na elektrodi mnogo manje veličine, nego negativni dio ciklusa, a taj fenomen se zove „ispravljanje luka“.

Postoje dvije teorije koje opisuju ovu pojavu: [4]

1. Oksidni film neferitnih metala (npr. kod aluminijske) djeluje kao „ispravljač“ koji otežava protjecanje elektrona sa radnog komada na elektrodu, dok protok elektrona od elektrode prema radnom komadu nije otežan.
2. Rastaljeni vrući, čisti aluminij ne emitira elektrone tako lako kao volfram. Rezultat toga je veći protok struje s vrućeg volframa na zavar, a manji protok sa zavara na elektrodu.



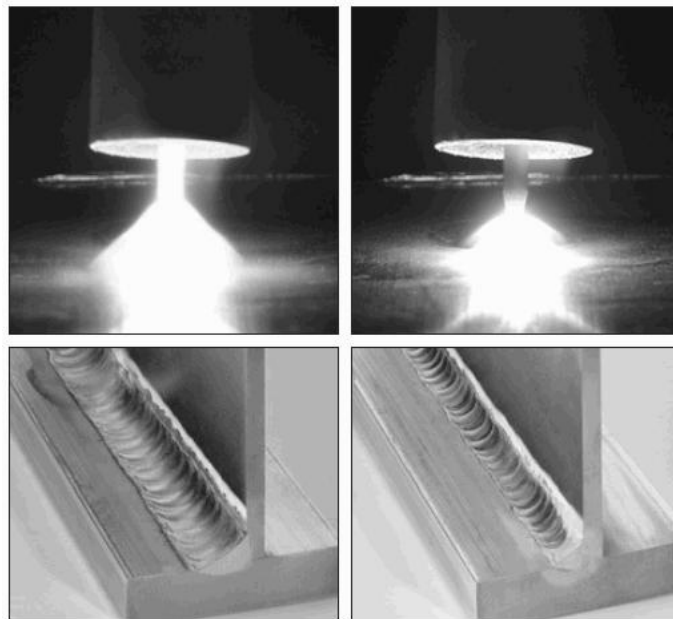
Slika 4. „Ispravljanje luka“ pod povećalom osciloskopa [4]

Prilikom zavarivanja izmjeničnom strujom, u električnom luku se mijenja pravac kretanja čestica sto puta u sekundi (kod struja frekvencije 50 Hz), što znači da je elektroda pedeset puta u sekundi na pozitivnom polu, a pedeset puta na negativnom polu.

Nedostatak električnog luka izmjenične struje je u tome što kod mijenjanja pravca gibanja čestica dolazi do teoretskih „gašenja“ i „paljenja“ električnog luka, što ga čini nestabilnim. Zbog toga se na izvor struje dodaje uređaj koji proizvodi visokonaponsku visokofrekventnu električnu struju, koja daje snažne izboje u svakom nultom periodu i poboljšava stabilnost električnog luka. [2]

Visoka frekvencija (do 1 MHz) služi za ponovnu uspostavu električnog luka, te poboljšava njegovu usmjerenost, dok električni luk vrši čišćenje oksida i protaljivanje. [4]

Na slici 5. je prikazana usporedba utjecaja frekvencije na dubinu i širinu penetracije prilikom zavarivanja (lijevo frekvencija od 60 Hz, desno frekvencija od 180 Hz).



Slika 5. Usporedba utjecaja frekvencije na dubinu i širinu penetracije
prilikom zavarivanja [4]

Neki uređaji za zavarivanje imaju mogućnost podešavanja vremena koliko će vremena elektroda biti na pozitivnome polu, a koliko vremena na negativnome, čime se dobije mogućnost kontroliranja dubine penetracije, zagrijavanja elektrode, manjeg unosa topline i sl. Kod TIG zavarivanja s izmjeničnom strujom moguće je zavarivati Al i Al legure jer se vrši čišćenje oksida a elektroda nije previše toplinski opterećena. [4]

Zavarivanje impulsnim strujama

Osnovna prednost impulsnog TIG zavarivanja je da je moguće generirati manji unos topline u radni komad prilikom zavarivanja. [4]

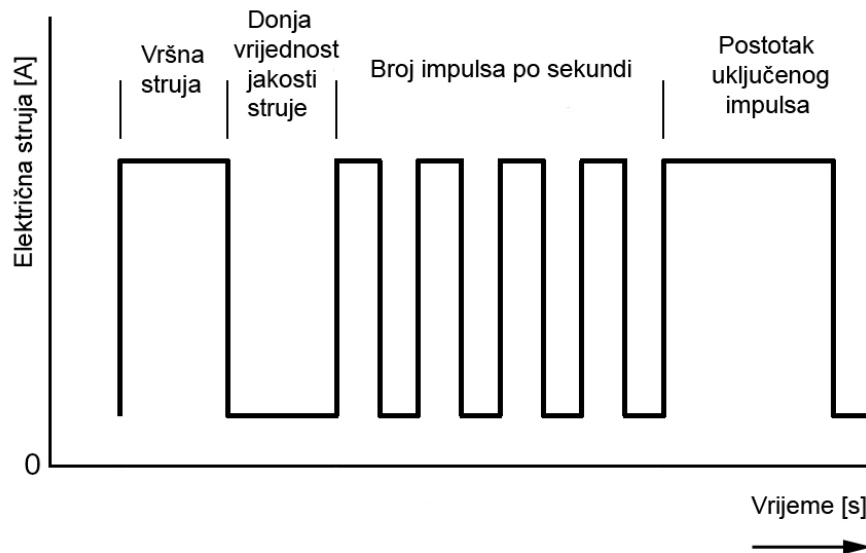
Vrijeme trajanja, te gornja i donja jakost struje se namještaju regulatorima na izvoru struje.

Osnovni parametri impulsnog TIG zavarivanja su: [4]

1. Vršna vrijednost jakosti električne struje – obično je viših vrijednosti, nego kod konvencionalnih postupaka TIG zavarivanja
2. Donja vrijednost jakosti električne struje – manjih je vrijednosti od vršne vrijednosti jakosti električne struje
3. Broj impulsa po sekundi – pokazuje koliko puta u sekundi jakost električne struje dosegne vršnu vrijednost

4. Postotak uključenog impulsa – je vrijeme trajanja vršne električne struje impulsa izraženo u postotku, a kontrolira koliko dugo se održava vršna električna struja, prije nego što se vrati na donju vrijednost jakosti električne struje zavarivanja

Slika 6. prikazuje oblike impulsa istosmjerne pulsirajuće struje. [4]



Slika 6. Oblici impulsa istosmjerne pulsirajuće struje [4]

Karakteristike impulsnog TIG zavarivanja: [4]

- dobra penetracija s manje unesene topline
- manje deformacije materijala uslijed unesene topline
- dobra kontrola taline kada se zavaruje u prisilnom položaju
- posebno primjenljiv za zavarivanje manjih debljina materijala
- lako se zavaruju materijali različitih debljina

Zavarivanje visokofrekvencijskim impulsnim strujama

Iako se impulsno TIG zavarivanje izvodi u granicama od 5 do 20 impulsa po sekundi, postoje i aplikacije gdje se primjenjuje visokofrekvencijsko impulsno zavarivanje (do 20 kHz/s). [4]

Kod visokofrekvencijskog impulsnog zavarivanja dolazi do generiranja električnog luka koji ima veću „krutost“. Prilikom povećanja frekvencije se također poboljšava miješanje taline metala što pomaže da ukjučine u zavaru isplivaju na površinu, nakon čega dolazi do boljih metalurških svojstva samog zavara. [4]

Najčešće se upotrebljava u sprezi sa mehaniziranim i automatiziranim uređajima te tamo gdje se traži stabilan luk kod zavarivanja malim jačinama električne struje.

Nedostatak visokofrekvencijskog TIG zavarivanja je skup izvor struje. [3]

2.3. Vrste TIG zavarivanja prema stupnju automatizacije

Postoje tri vrste TIG zavarivanja prema stupnju automatizacije, a to su: [1]

- Ručno TIG zavarivanje
- Poluautomatizirano TIG zavarivanje
- Automatizirano TIG zavarivanje

Ručno TIG zavarivanje

Slika 7. prikazuje ručno TIG zavarivanje gdje zavarivač vodi pištolj i dodatni materijal. [4]

Kada se vrh volframove elektrode primakne na dovoljnu udaljenost od radnog komada, počinje teći struja visoke frekvencije, koja stvara uvjete da se uspostavi električni luk, koji tali osnovni metal, te tako tvori zavareni spoj. Može se dodavati i dodatni materijal, u obliku žice, u talinu, pod električni luk (ne u električni luk), koji se zajedno s talinom osnovnog metala sjedinjuje u zavareni spoj. Prestankom pritiska na gumb pištolja, prekida se električni luk, a zaštitni plin teče još neko vrijeme i štiti talinu i vrh elektrode od plinova iz atmosfere. Za to vrijeme zavarivač ne smije micati pištolj s mjesta zavarivanja.



Slika 7. Ručno TIG zavarivanje [4]

Poluautomatizirano TIG zavarivanje

Princip rada je gotovo isti kao i kod ručnog postupka, s time da je razlika u načinu dodavanja dodatnog materijala, koji je ovdje automatiziran.

Pritiskom gumba na pištolju, osim prije opisanog ručnog procesa, aktivira se i elektromotor sustava za dovod žice, koji se nalazi u komandnom ormariću. Brzina gibanja žice koja dolazi pod električni luk gdje se tali zajedno s osnovnim materijalom se može regulirati.

Slika 8. prikazuje pištolj za poluautomatizirano TIG zavarivanje. [5]

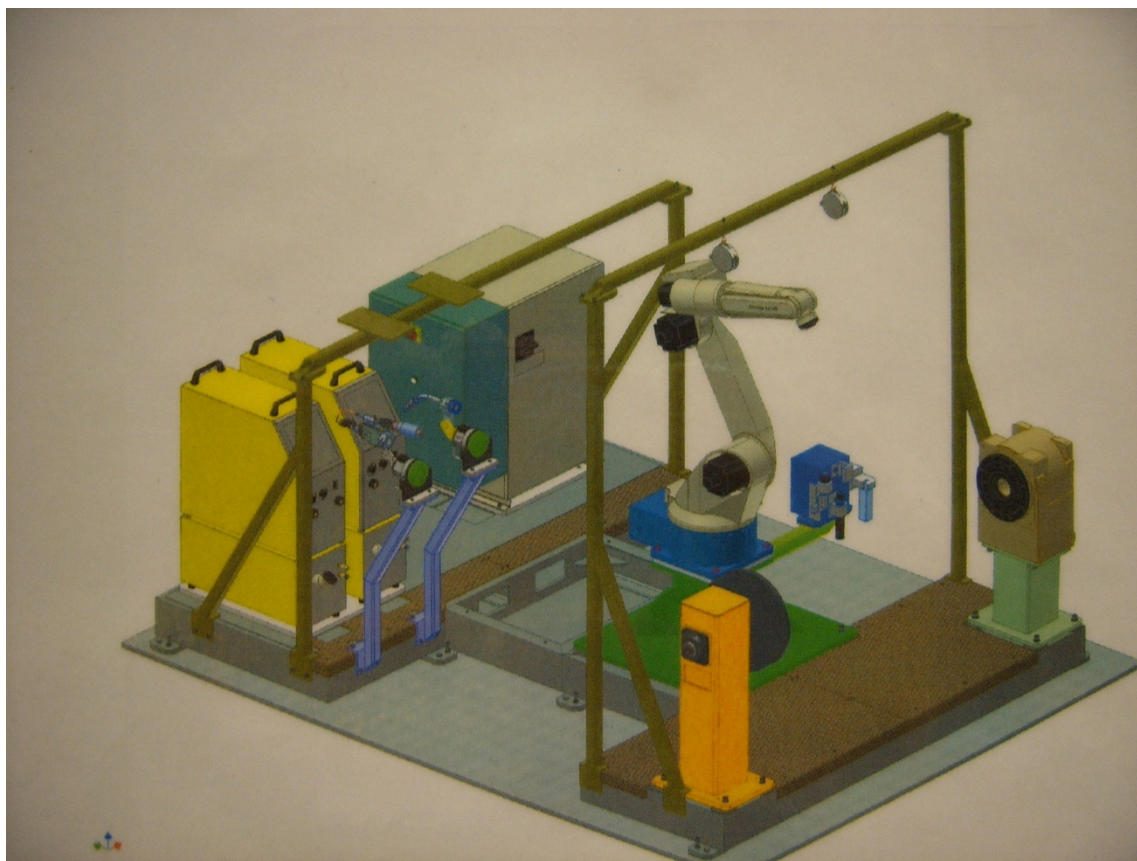


Slika 8. Pištolj za poluautomatizirano TIG zavarivanje [5]

Automatizirano TIG zavarivanje

Zavarivanje TIG postupkom moguće je automatizirati, što podrazumijeva automatizaciju sa ili bez robota. Automatizacijom je zavar moguće izvesti bez utjecaja ljudskih faktora na zavar, te povećati kvalitetu izvedenog zavora, naročito kod većih serija, te ubrzati samo zavarivanje.

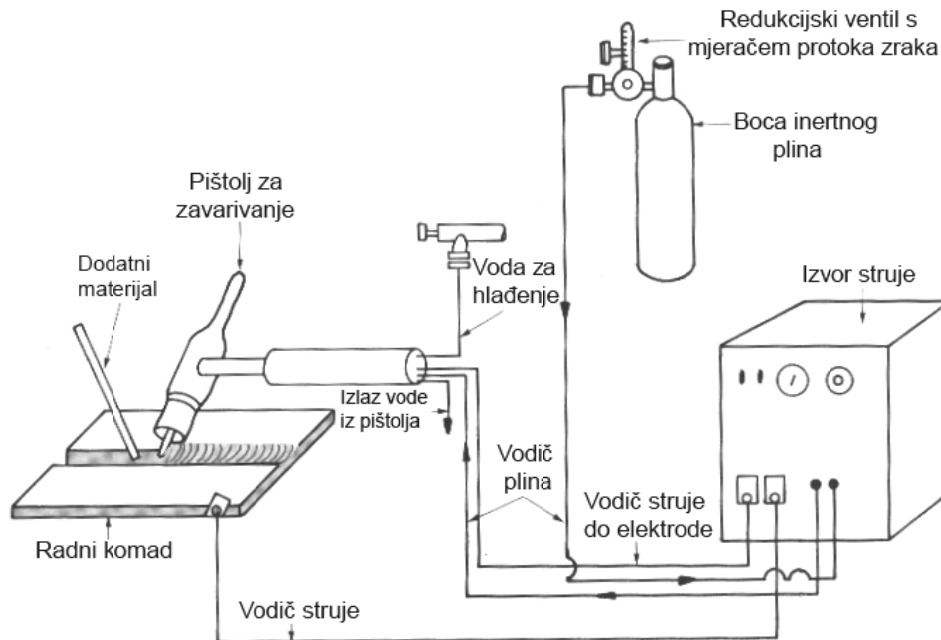
Slika 9. prikazuje robotsku stanicu za TIG zavarivanje VRC-1G MIG + 1G TIG/1dm. [6]



Slika 9. Robotska stanica za TIG zavarivanje VRC-1G MIG + 1G TIG/1dm [6]

2.4. Oprema za TIG zavarivanje

Na slici 10. prikazana je oprema za ručno TIG zavarivanje. [7]

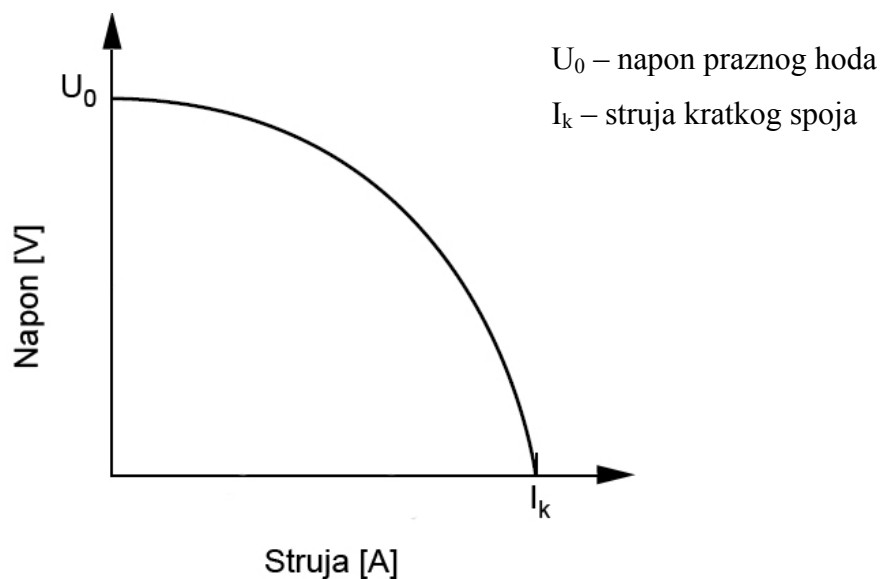


Slika 10. Oprema za ručno TIG zavarivanje [7]

Izvor struje

Izvor struje za zavarivanje je električni uređaj koji daje na mjestu zavarivanja električnu struju s karakteristikama pogodnim za zavarivanje.

Izvori struje imaju strmu karakteristiku. To znači da se struja održava tijekom zavarivanja na približno jednakim vrijednostima, bez obzira na to kako se mijenja napon (visina električnog luka koju sam zavarivač određuje). U idealnom slučaju bi se jakost struje održavala na stalnim vrijednostima prilikom zavarivanja, međutim u praksi se malo mijenja (smanjenjem napona se jakost struje malo smanjuje, a povećanjem napona se jakost struje malo povećava – pri tome se napon više mijenja, a struja manje). Na slici 11. je prikazana strma karakteristika izvora struje za TIG zavarivanje. [1]



Slika 11. Strma karakteristika izvora struje kod TIG zavarivanja [4]

Uređaj za proizvodnju visokofrekventne električne struje je dodatni mali transformator, koji proizvodi električnu struju visokog napona od nekoliko tisuća volti, te se ugrađuje na izvore izmjenične i istosmjerne struje zavarivanja. Budući da je frekvencija struje jako visoka (20 do 50 kHz), ne postoji opasnost po život. Ona služi za uspostavljanje električnog luka bez dodira vrha elektrode s radnim komadom, te za održavanje stabilnosti električnog luka kod zavarivanja s izmjeničnom strujom. [1]

Današnji izvori struje su pretežito izvori čija je jakost struje elektronički kontrolirana i u koje su ugrađeni invertori. Izvor struje tijekom zavarivanja stalno provjerava izlaz struje na električnom luku sa strujom koja je tražena prilikom zavarivanja, a definirana samim izvorom struje. [4]

Princip rada invertera je slijedeći: [4]

1. Jednofazna, ili trofazna izmjenična struja visokog napona i male jakosti struje se pretvara u istosmjernu struju
2. Nakon toga se ta struja filtrira i pretvara u izmjeničnu preko tranzistorskih pretvarača
3. Transformator smanjuje napon, te povećava jakost struje
4. Istosmjerna struja se formira da bi bila karakteristika pogodnih za zavarivanje, ili pretvara u izmjeničnu struju, ovisno o potrebi

Uređaji za TIG zavarivanje su uglavnom građeni kombinirano te se koriste kao transformatori i kao ispravljači.

Intermitencija ili radni ciklus uređaja za zavarivanje je od izuzetne važnosti prilikom zavarivanja. Definira se kao vrijeme rada izvora struje za zavarivanje određenom jačinom struje prije nego dolazi do prekoračenja određene temperature i taljenja izolacije izvora struje. Primjerice, izvor struje koji ima intermitenciju 70 % pri nekoj određenoj jačini struje u trajanju od 10 min može zavarivati 7 min, a preostale 3 min treba ostaviti uređaj za zavarivanje da se ohladi, tj. da radi u praznom hodu (dok je izvor struje ugašen hlađenje ne radi, tj. ventilator se ne okreće). Radni ciklus nije akumulativan što znači da se ne može npr. kod uređaja koji ima intermitenciju 50 % zavarivati 30 min i nakon toga ostaviti uređaj za zavarivanje u praznom hodu da se ohladi opet 30 min.

Izvor struje koji ima intermitenciju 100 % može biti korišten za zavarivanje cijelo vrijeme, ali pri točno određenoj jačini struje, ne većoj. [4]

Slika 12. prikazuje izvor struje za TIG zavarivanje. [8]



Slika 12. Izvor struje za TIG zavarivanje [8]

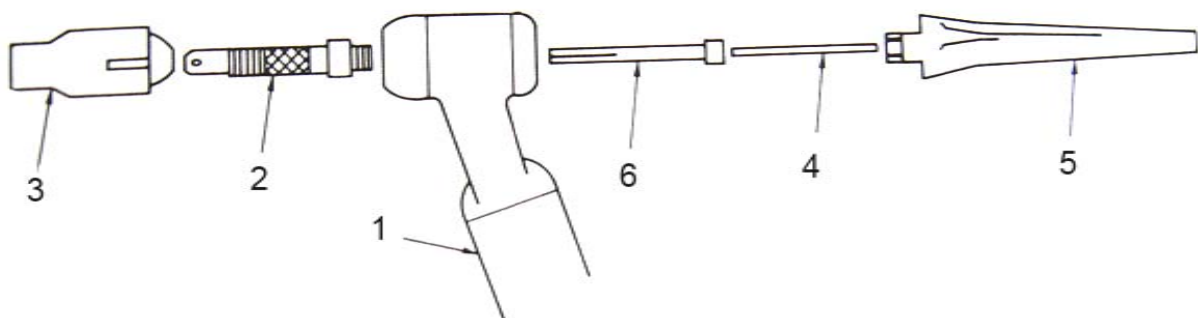
Pištoltj za zavarivanje

Pištoltji za TIG zavarivanje mogu se podijeliti u dvije osnovne grupe: [1]

1. Bez hlađenja rashladnom tekućinom
 - hladi se samo zrakom
 - manje jakosti struje zavarivanja (150-200 A)
 - kraća vremenska opterećenja
2. S hlađenjem rashladnom tekućinom
 - rashladna tekućina je voda ili antifriz
 - veće jakosti struje zavarivanja
 - duža vremenska opterećenja

Postoje pištoltji različitih oblika i dimenzija, ovisno o mjestu na kojem se zavaruje, te pristupačnosti mjesta zavara. Tipičan pištoltj za ručno TIG zavarivanje koji se najčešće primjenjuje (prikazan na slici 13.) sastoji se od: [1]

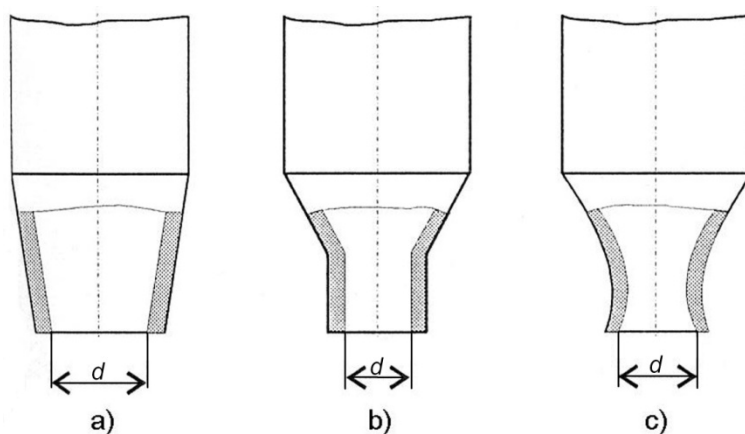
1. držača za ruku – u njemu završavaju svi provodnici (električne struje za zavarivanje, električne struje za komande, dovod i odvod vode, dovod plina), te se nalazi gumb za uključivanje procesa zavarivanja
2. stezača volframove elektrode sa steznom kontaktnom cjevčicom
3. sapnice za plin
4. volframove elektrode
5. zaštitne kape na volframovoj elektrodi
6. kontaktne cjevčice – služi za dovođenje struje zavarivanja na elektrodu



Slika 13. Pištoltj za TIG zavarivanje [9]

Sapnica za zaštitni plin

Služi za usmjeravanje plina tokom zavarivanja, a može biti različitih oblika i veličina, ovisno o jakosti struje na mjestu zavarivanja, kao što je prikazano na slici 14. [10]



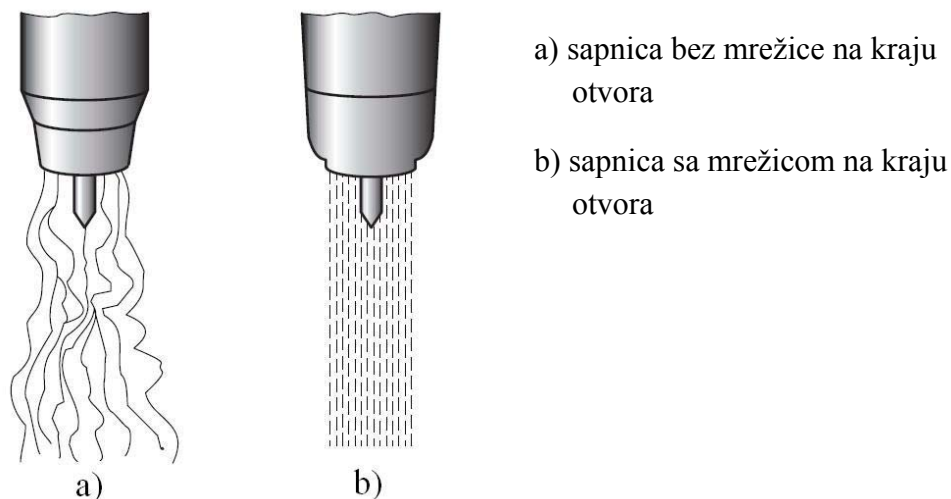
Slika 14. Najčešće korištene izvedbe sapnica [10]

- a) konusni oblik
- b) cilindrični oblik
- c) profilirani oblik

Sapnica može biti izrađena od različitih materijala koji su otporni na visoke temperature. Najčešće je izrađena od vatrootpornog minerala, keramike (za manje i srednje jakosti struje zavarivanja) i iz kromiranog bakra hlađena vodom (za veće jakosti struje zavarivanja). [2]

Izbor veličine sapnice se određuje prema promjeru elektrode za zavarivanje, budući da je kod veće jakosti struje zavarivaja potrebna i veća količina zaštitnog plina kao i veći promjer elektrode. Kod elektroda manjeg promjera (do promjera 2,4 mm) odnos promjera elektrode i unutarnjeg promjera sapnice iznosi približno 1:5 – 1:6. Kod elektroda većeg promjera taj odnos je približno 1:4. [2]

Na kraj otvora sapnice se može staviti mrežica koja poboljšava stabilnost protoka plina i na taj način sprječava turbulencije, te je protok zaštitnog plina stabilan i na većim udaljenostima od sapnice do radnog komada, kao što je prikazano na slici 15. Prednost dugog stabilnog toka zaštitnog plina je činjenica da elektroda može više viriti van iz pištolja, te zavarivač ima veći pregled nad talinom zavora. [11]



Slika 15. Nestabilan i stabilan protok zaštitnog plina [11]

Rashladni sustav

Rashladni sustav se upotrebljava za hlađenje pištolja, a rashladna sredstva koja se koriste su voda (deionizirana i destilirana) i/ili antifriz, te primjese antikorozivnih dodataka, a dovode se crijevima. Dovodno crijevo je uže, a odvodno šire, jer se u njega obično stavlja provodnik električne struje za zavarivanje, tako da voda kod izlaska hladi provodnik.

Tri su vrste rashladnih sustava, koji su ugrađeni u sklopu aparature za TIG zavarivanje: [1]

1. Otvoreni – crijevo se priključuje direktno na vodovod
2. Zatvoreni centralni – sastoji se od velikog spremnika za vodu i crpke koja služi za pogon vode po dijelovima aparature
3. Zatvoreni pojedinačni – sastoji se od malog spremnika, hladnjaka, elektromotora i crpke

U sustavima koji imaju ugrađenu crpku, antifriz je bolje rashladno sredstvo, jer ujedno podmazuje crpku.

Potrebno je osigurati da postoji dobro brtvljenje sustava, posebno na pištolju za zavarivanje, jer ako se na pištolju stvara kondenzat, vodik iz vode može ući u zavar, te stvara poroznost zavara, što jako loše utječe na mehanička svojstva samog zavara. [1]

Sustav za dovod zaštitnog plina

Služi za dovod plina do mjesta zavarivanja, a sastoji se od: [1]

1. Čelične boce ili spremnika plina
2. Redukcijskog ventila s mjerачem protoka plina – na redukcijskom ventilu regulira se protok plina
3. Crijeva za dovod plina do pištolja
4. Magnetskog ventila – pritiskom na gumb koji se nalazi na pištolju uključi se magnetski ventil, te poteče plin (prije uspostavljanja električnog luka, da se izbací zrak iz crijeva i mjesta zavarivanja); prestankom držanja gumba na pištolju, najprije se prekida električni luk, a zaštitni plin još neko vrijeme teče (1 s za svakih 10 A jakosti struje kojom se zavaruje, zbog zaštite taline koja se skrućuje i zagrijanog vrha elektrode koji se hladi)
5. Crijeva za dovod plina s magnetskog ventila na pištolj

Slika 16. prikazuje čelične boce za zaštitni plin.



Slika 16. Boce za zaštitni plin

Volframova elektroda

Volframova elektroda je provodnik električne struje s pištolja na radni komad, prilikom čega se uspostavlja električni luk između radnog komada i volframore elektrode koji tali metal osnovnog i dodatnog materijala, a da se pri tome volframova elektroda ne tali. Temperatura tališta čistog volframa je 3683 K. [1]

Elektroda za TIG zavarivanje izrađuje se iz čistog volframa, ili iz volframa s dodacima: [1]

1. Čista volframova elektroda – uglavnom se koristi za zavarivanje izmjeničnom električnom strujom (zelene boje)
2. Volframova elektroda legirana s torijem – može se opterećivati većim jakostima struje zavarivanja, ima nižu granicu minimalnog opterećivanja i trajnija je (žute, crvene, ljubičaste i narančaste boje)
3. Volframova elektroda legirana cirkonijem – posebno se primjenjuje tamo gdje je ograničeno prisustvo volframa i torija u zavaru (smeđe i bijele boje)
4. Volframova elektroda legirana s lantanom – odlična je za rezanje plazmom (crne boje)

Volframore elektrode označavaju se prema sastavu materijala elektrode, u slovnoj, brojećanoj i oznaci u boji, što je prikazano u tablici 2. [12]

Tablica 2. Odabir volframovih elektroda prema vrsti osnovnog materijala i struji [12]

Oznaka (ISO)	Dodatak oksida (%)	Vrsta oksida	Oznaka bojom
W	---	---	Zelena
WC 20	1,8 - 2,2	CeO ₂	Siva
WL 10	0,9 - 1,2	La ₂ O ₃	Crna
WL 15	1,4 - 1,6	La ₂ O ₃	Zlatna
WL 20	1,9 - 2,1	La ₂ O ₃	Plava
WZ 8	0,7 - 0,9	ZrO ₂	Bijela
WT 10	0,8 - 1,2	ThO ₂	Žuta
WT 20	1,7 - 2,2	ThO ₂	Crvena
WT 30	2,8 - 3,2	ThO ₂	Ljubičasta
WT 40	3,8 - 4,2	ThO ₂	Narančasta

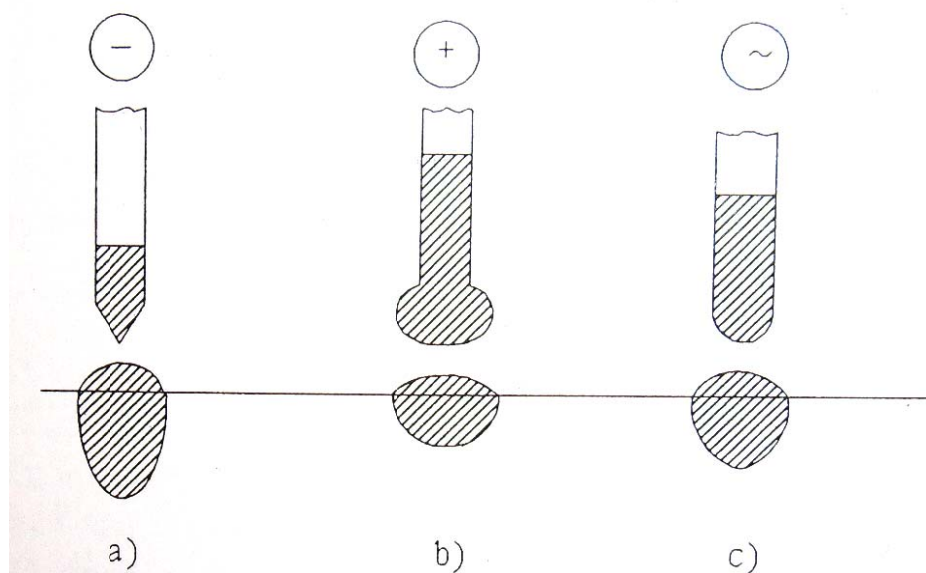
Za zavarivanje aluminija i magnezija uzimaju se u pravilu elektroda iz čistog volframa ili legirana s cirkonijem,. Za zavarivanje ostalih metalnih materijala u pravilu se uzimaju elektrode legirane s torijem. [2]

Izrađuju se u promjerima 0,5; 1,0; 1,6; 2,4; 3,2; 4,0; 6,4 i 8,0 mm, a dužine su 50; 75; 150; 175 mm. [1]

Oblici vrha volframove elektrode mogu biti zašiljeni i zaobljeni, ovisno o materijalu koji se zavaruje, odnosno ovisno o vrsti struje zavarivanja: [1]

1. Zašiljen vrh volframove elektrode – svi metali osim Al i Mg, elektroda je na minus polu, dužina zašiljenog dijela iznosi 1 – 4 puta promjer elektrode; brušenje vrha je najbolje vršiti na finom brusu da bi površina bila što manje hrapavosti, čime se dobiva mirniji električni luk, te zašiljenost traje duže
2. Zaobljen vrh volframove elektrode – zavarivanje Al i Mg, izmjeničnom električnom strujom

Slika 17. prikazuje oblik vrha elektrode i veličinu zagrijanosti vrha u ovisnosti o vrsti struje (jednaka jakost struje u sva tri slučaja). [13]

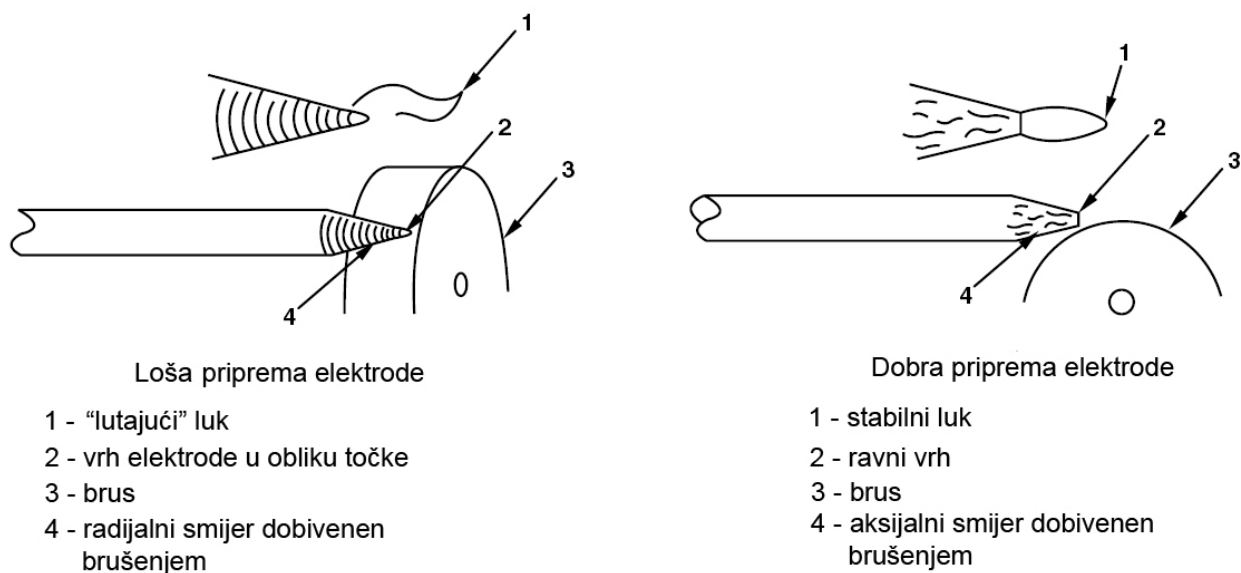


Slika 17. Oblik vrha elektrode i veličina zagrijanosti vrha u ovisnosti o vrsti struje (jednaka jakost struje u sva tri slučaja) [13]

Treba biti posebno oprezan prilikom brušenja elektrode, jer ako se ne brusi na ispravan način, dolazi do pojave nestabilnog električnog luka prilikom zavarivanja. Također se ne smije

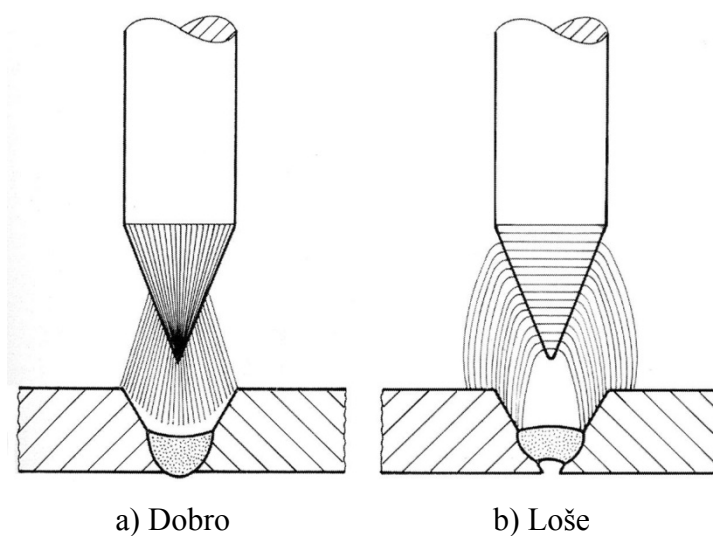
brusiti više vrsta elektroda ili nekih drugih metala na istom brusu jer može doći do kontaminacije površine elektrode drugom vrstom materijala, koji može proizvesti razne nepravilnosti u zavaru, kao što su uključine i slično.

Slika 18. prikazuje lošu i dobru pripremu volframove elektrode. [4]



Slika 18. Loša i dobra priprema volframove elektrode [4]

Slika 19. prikazuje izgled električnog luka nakon brušenja elektrode. [10]



Slika 19. Električni luk nakon brušenja elektrode [10]

Oštećenost i onečišćenost vrha volframove elektrode može se javiti uslijed: [1]

- preopterećenosti elektrode strujom zavarivanja – vrh elektrode bez sjaja
- slabe zaštite vrha elektrode – vrh elektrode je plave, ili plavo-crvene boje
- doticanja vrha s osnovnim materijalom ili talinom ili dodatnim materijalom – ukoliko je vrh samo onečišćen stranim metalom, može se vrh očistiti uspostavljanjem električnog luka na nekoj pomoćnoj pločici, dok strani metal ne ispari; oštećeni vrh elektrode treba ponovno brusiti

2.5. Zaštitni plinovi

Zaštitni plinovi koji se koriste prilikom TIG zavarivanja su od velike važnosti za odabir parametara zavarivanja i svojstva dobivenog zavara.

Najvažnije funkcije zaštitnog plina prilikom zavarivanja su: [9]

1. Zaštita rastaljenog metala od plinova iz atmosfere (kisika, dušika)
2. Podržavanje plazme električnog luka
3. Povećanje stabilnosti električnog luka
4. Utjecaj na oblik i dubinu penetracije zavara
5. Utjecaj na estetski izgled samog zavara
6. Utjecaj na razinu para prilikom zavarivanja

Upotrebom optimalnog zaštitnog plina, ovisno o parametrima i vrsti zavarivanja može se poboljšati kvaliteta zavara i smanjiti troškove zavarivanja.

Fizikalne karakteristike zaštitnog plina

Značajne fizikalne karakteristike zaštitnog plina su:

1. Ionizacijski potencijal
2. Toplinska vodljivost
3. Disocijacija i rekombinacija
4. Čistoća plina
5. Gustoća plina

1. Ionizacijski potencijal

Ionizacijski potencijal je energija, izražena u elektron voltima (eV), potrebna za uzimanje jednog elektrona od atoma plina – pretvarajući ga u ion. Vrijednost potencijala ionizacije se smanjuje kako se molekularna masa plina povećava. Ionizacijski potencijal ima također veliki utjecaj na paljenje i na stabilnost električnog luka. [9]

2. Toplinska vodljivost

Toplinska vodljivost pokazuje kako pojedini plin može provoditi toplinu. Utječe na radijalni gubitak topline od centra prema rubovima električnog luka, kao i na prijenos topline između plazme i rastaljenog metala. Prema tome, plin koji ima veću toplinsku vodljivost vodi toplinu

prema van iz jezgre, što rezultira širom jezgrom električnog luka, te višom temperaturom jezgre električnog luka. [9]

3. Disocijacija i rekombinacija

Zaštitni plinovi čije su molekule građene od više atoma (vodik, kisik) prilikom zagrijavanja na visoke temperature unutar električnog luka, se razbijaju, ili disociraju u atome od kojih su građene molekule. Atomi su nakon toga barem djelomično ionizirani, te tvore slobodne elektrone i protok struje. Kada disocirani plin dođe u kontakt s relativno hladnom površinom radnog komada, atomi se rekombiniraju i otpuste toplinu. Ta toplina rekombinacije djeluje na plin da se ponaša kao da ima višu toplinsku vodljivost. [9]

4. Čistoća plina

Ovisno o tome koji metal se zavaruje, i kojom tehnologijom zavarivanja, vrlo male količine nečistoća u zaštitnome plinu mogu značajno utjecati na brzinu zavarivanja, ponašanje taline, skrućivanje zavara i poroznost zavara.

Uvijek postoji mogućnost da je plin, već prilikom punjenja u bocu kontaminiran nečistoćama, mada, veća mogućnost je da će nečistoće ući negdje između spremnika plina (plinske boce) i pištolja za zavarivanje. Iz tog razloga, treba obratiti pažnju na pravilno konstruiranje ventila, i sustava za provođenje plina do zavara (cijevi, pištolj za zavarivanje).

Neki metali, kao npr. ugljični čelik imaju visoke tolerancije na čistoću plina, dok npr. zavarivanje titana traži zaštitne plinove vrlo visoke čistoće, budući da oni imaju vrlo niske tolerancije na čistoću zaštitnog plina. [9]

5. Gustoća plina

Gustoća plina je masa plina po jedinici volumena. Gustoća je jedan od glavnih faktora koji utječu na efikasnost zaštitnog plina. Načelno, da bi osigurali adekvatnu zaštitu taline zavara, plinovi teži od zraka, kao što su argon i ugljični dioksid, trebaju manji protok plina prilikom zavarivanja, nego što je potrebno kod lakših plinova, kao što je npr. helij. [9]

Opis pojedinih zaštitnih plinova kod TIG zavarivanja

Zaštitni plinovi koji se koriste kod TIG zavarivanja su:

1. Argon
2. Helij
3. Vodik
4. Dušik

1. Argon

Argon je najviše upotrebljavani zaštitni plin kog TIG zavarivanja, te se dobiva iz atmosfere odvajanjem od ukapljenog zraka.

On je inertni plin (znači da ne sudjeluje u kemijskim reakcijama s talinom metala), a karakterizira ga niska toplinska vodljivost, što znači da nije dobar provodilac topline, što rezultira kompaktnijim električnim lukom veće gustoće (gustoća električnog luka utječe na koncentraciju energije u električnom luku). Kod zavarivanja argonom energija je usmjerena na usko područje [4]. Time se dobije mala dubina penetracije i manje protaljivanje, što je korisno kod zavarivanja tankih materijala, te zavarivanja u prisilnim položajima (zbog manjeg tečenja taline). [9]

Malog je ionizacijskog potencijala (15,7 eV), što znači da može lako pretvoriti atome u ione što osigurava dobro paljenje električnog luka i veliku stabilnost električnog luka prilikom zavarivanja istosmjernom strujom elektrodom na negativnom polu, te jako dobro čišćenje oksidnog sloja prilikom upotrebe izmjenične struje. [9]

Prilikom zavarivanja važna je čistoća argona, a ona iznosi minimalno 99.95 %, što znači da se u boci plina argona smije nalaziti maksimalno 0,05 % nečistoća. Ta vrijednost je prihvatljiva za većinu metala koji se zavaruju TIG zavarivanjem, međutim prilikom zavarivanja vatrootpornih i reaktivnih (titan, molibden, tantal) metala minimalna čistoća argona iznosi 99,997 %. [3]

2. Helij

Helij je inertni plin vrlo male mase, a dobiva se odvajanjem od zemnog plina. Čistoća samog helija prilikom zavarivanja iznosi najmanje 99,99 %.

Veće je toplinske vodljivosti od argona, pa ima i širi električni luk. Toplina iz središta električnog luka se može brže prenijeti do površine radnog komada, odnosno zavora, što rezultira većom dubinom penetracije i većom količinom unijete topline u zavar. To može biti korisno kod zavarivanja metala koji imaju veliku toplinsku vodljivost (bakar), budući da brže odvede toplinu, te kod primjene mehaniziranih uređaja za zavarivanje kod zavarivanja velikim brzinama.

Većeg je ionizacijskog potencijala (24,5 eV) od argona, pa je teže paljenje električnog luka, naročito kod manjih jakosti električne struje.

Budući da helij ima malu masu, potrebne su veće brzine protoka plina (otprilike tri puta veće nego kod argona). Time se dolazi do veće potrošnje samog plina, te je potrebno dobro ocijeniti da li se isplati upotreba helija. [3]

Česta je i kombinacija argona i helija, s ciljem povećanja brzine zavarivanja i penetracije u odnosu na TIG zavarivanje u zaštiti argona.

3. Vodik

Vodik je plin najmanje mase, ima najveću toplinsku vodljivost, te se toplina može velikom brzinom prenijeti do zavora kroz električni luk. Time se dobiva veća penetracija, te čišći zavar.

Koristi se u kombinaciji s argonom prilikom zavarivanja austenitnih čelika i niklovih legura. Potrebno je biti posebno oprezan prilikom zavarivanja s dodatkom vodika, budući da je moguća pojava vodikove poroznosti u zavaru. Zato se izbjegava zavarivanje u više prolaza i količina vodika u mješavini iznosi do 15 %. [9]

4. Dušik

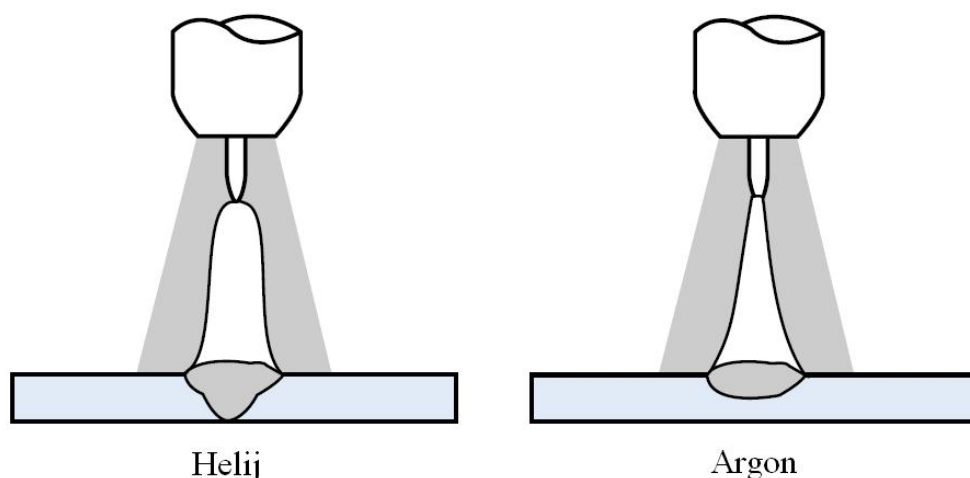
Ima veću toplinsku vodljivost od argona. Upotrebljava se u kombinaciji s argonom (do 3 % dušika) i to obično kod zavarivanja metala koji imaju visoku toplinsku vodljivost (bakar). Međutim mješavine se dušika upotrebljavaju za zavarivanje samo nekih metala kao što su duplex čelici (stvaranje austenitne strukture dodatkom dušika) i austenitni čelici, te niklovih legura, jer kod ostalih metala izrazito povećava mogućnost stvaranja pukotina. [9]

Usporedba argona i helija

Karakteristike argona u odnosu na helij:

- slabije toplinske vodljivosti
- daje stabilniji električni luk
- lakša uspostava električnog luka
- omogućava bolje čišćenje oksidnog sloja prilikom zavarivanja aluminija ili magnezija izmjeničnom strujom
- manja dubina protaljivanja kod iste jakosti i vrste električne struje zavarivanja
- približno je 10 puta teži od helija
- za isti intenzitet zaštite taline potrebno je 2 do 3 puta manje argona od helija kod zavarivanja u položenom položaju
- manje je cijene, i lakše dobavljivosti

Slika 20. prikazuje oblik električnog luka i izgled zavora prilikom zavarivanja zaštitnim plinom argonom, odnosno helijem. [4]

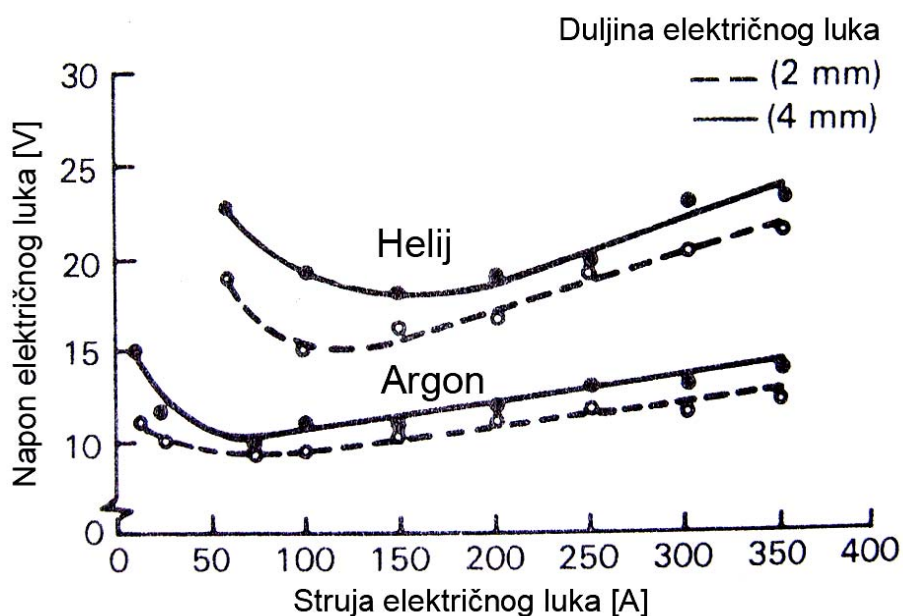


Slika 20. Oblik električnog luka i izgled zavora prilikom zavarivanja zaštitnim plinom argonom, odnosno helijem [4]

Na slici 21. prikazana je veza između napona električnog luka i struje električnog luka prilikom zavarivanja aluminija TIG postupkom, zaštitnim plinom argonom, odnosno helijem. Iz slike je vidljivo da je napon električnog luka prilikom zavarivanja helijem značajno veći od napona električnog luka prilikom zavarivanja argonom, a kod jednake jačine struje. To znači da je helij veće toplinske vodljivosti, tj. da u zavar može unijeti više topline potrebne za

taljenje metala, što je posebno pogodno kod zavarivanja debljih materijala i materijala koji imaju veću toplinsku vodljivost, ili relativno visoke temperature tališta.

Međutim, iz slike je vidljivo da kod nižih jačina struje smanjenjem jačine električne struje napon električnog luka počinje rasti. Kod helija se to zbiva u rasponu od 50 do 150 A, a to su jačine struja kod kojih se uglavnom zavaruju tanki materijali. Pošto do istog fenomena dolazi kod argona, ali pri tek ispod 50 A, argon se upotrebljava za zavarivanje pri strujama od 50 do 150 A, budući da on pruža bolju kontrolu električnog luka pri tim jačinama električne struje. [3]



Slika 21. Veza napona i struje električnog luka u odnosu na zaštitne plinove argon i helij [3]

2.5.1. Funkcija plinske zaštite korijenskog zavora

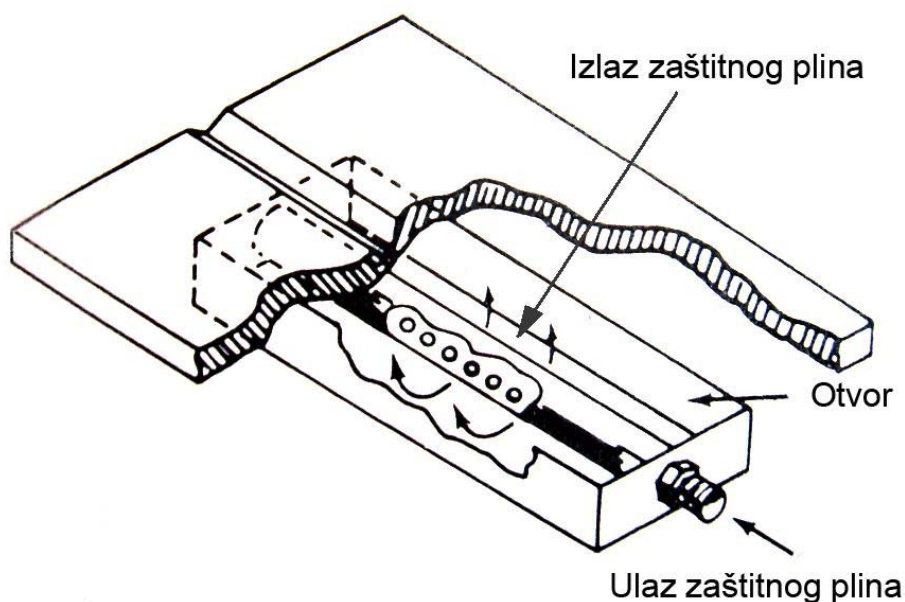
Funkcija plinske zaštite korijenskog zavora je zaštita korijena zavora od utjecaja plinova iz atmosfere. Kada se provodi zavarivanje s jedne strane i samo s te strane se štiti talina zavora od utjecaja plinova iz atmosfere, s druge strane zavora je također potrebna zaštita, jer bi se u suprotnom u korijenu zavora mogle skupiti nečistoće iz zraka iz atmosfere koje loše utječu na mehanička svojstva zavora. Također se dobiva i sjajnija površina, te smanjena mogućnost oksidacije površine korijena zavora.

Zaštita korijenske strane zavora se vrši na način da se zrak s one strane zavora na kojoj nema zaštite od utjecaja plinova iz atmosfere odstranjuje, tj. kontaminira zaštitnim plinovima. Najčešće se upotrebljava Ar i mješavina N_2 ili H_2 i tzv. „formir“ plin.

Nakon što se stvori zaštitna atmosfera protok plina se smanjuje, te se održava tek toliko da postoji mali tlak unutar prostora u kojem se nalazi zaštitni plin. Kada je korijenski zavar dovršen zaštitni plin se ispušta. [3]

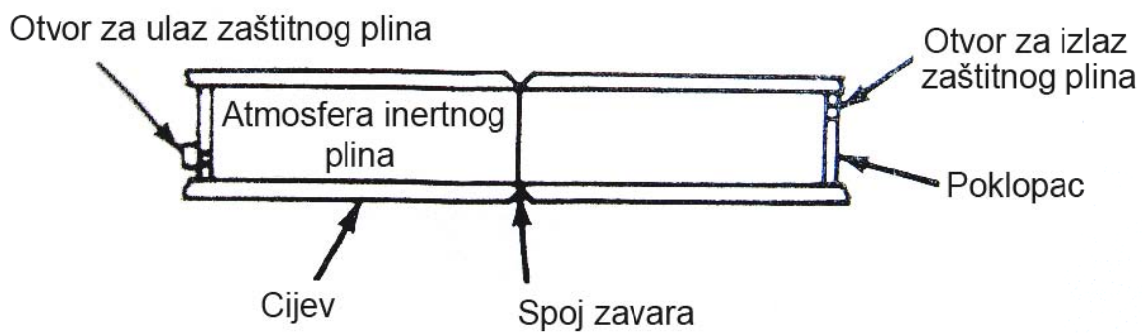
Postoje razni sistemi i uređaji koji štite korijen zavora sa zadnje strane od plinova iz atmosfere.

Za zaštitu korijena zavora može poslužiti naprava koja je u obliku kućišta te ima otvor s gornje strane kroz koju slobodno van struji zaštitni plin (slika 22.). Ta naprava se pričvrsti na korijen zavora kojeg se želi štititi od utjecaja plinova iz atmosfere, te se u nju pusti zaštitni plin, koji izlazi prema korijenu zavora a nakon toga je moguće zavarivati. Pri tome treba paziti da ne postoji veliki tlak zaštitnog plina u prostoru te naprave, jer bi prilikom zavarivanja zadnjih nekoliko desetaka milimetara zavora moglo doći do izbacivanja taline prema gornjoj strani zavora. Na osnovu ovog principa se može također izraditi „putujuća“ naprava koja bi tako štitila korijen zavora kod zavarivanja većih dužina zavora. [3]



Slika 22. Zaštita korijena zavora u obliku kućišta [3]

Također postoje rješenja kod zavarivanja cijevi da se otvori zatvore s poklopcima i da se unutra upuhuje zaštitni plin te se time stvori zaštitna atmosfera unutar cijevi, koja će s te strane štiti korijen zavara (slika 23). [3]



Slika 23. Zaštita korijena zavara kod zavarivanja spoja cijevi [3]

2.6. Parametri zavarivanja

Odabir parametara prilikom zavarivanja određuje kakva će biti kvaliteta zavara nakon zavarivanja, pa stoga treba obratiti posebnu pozornost na njihov odabir.

Utjecajni čimbenici na kvalitetu zavara koji se mogu mijenjati i koji se odabiru prilikom TIG zavarivanja su:

1. Jakost struje zavarivanja
2. Napon zavarivanja
3. Polaritet elektrode
4. Vrsta i promjer volframove elektrode
5. Protok i vrsta zaštitnog plina
6. Brzina zavarivanja
7. Položaj pištolja i dodatnog materijala
8. Dodavanje žice i gibanje pištolja (tehnika rada)

Tablica 3. prikazuje orijentacijske podatke za TIG zavarivanje nehrđajućih čelika. [14]

Tablica 3. Orijentacijski podaci za TIG zavarivanje nehrđajućih čelika [14]

Debljina lima (mm)	Oblik spoja	Ø elektrode (mm)	Ø žice (mm)	Jakost struje (mm)	Protok Argona (l/min)
1,5	I-spoj Preklopni spoj Kutni spoj	1,6	1,6	40 – 60 50 – 70 50 – 70	7
3,0	I-spoj Preklopni spoj Kutni spoj	2,4	2,5	65 – 85 90 – 110 90 – 110	7
5,0	I-spoj Preklopni spoj Kutni spoj	3,2	3,0	100 – 125 125 – 150 125 – 150	10
6,0	I-spoj Preklopni spoj Kutni spoj	3,2	3,0	135 – 160 160 – 180 160 – 180	10

1. Jakost struje zavarivanja

Jakost struje zavarivanja bira se prema vrsti i debljini materijala koji se zavaruje, obliku i dimenzijama spoja, te položaju zavarenog spoja. Područje jakosti struje zavarivanja je od 40 do 400 A [15]. Kod ručnog TIG zavarivanja nehrđajućih čelika za sučeljeni spoj u vodoravnom položaju jakost struje iznosi približno 30 A za svaki milimetar debljine lima [2]. Za isti slučaj prilikom zavarivanja aluminija jakost struje iznosi približno 45 A za svaki milimetar debljine lima. Prilikom zavarivanja u prisilnom položaju jakost struje zavarivanja je 25 % manja. [2]

Kod mehaniziranog TIG zavarivanja jakost struje zavarivanja je veća nego kod ručnog zavarivanja, i to za onoliko koliko se mogu povećati brzine zavarivanja. [2]

2. Napon zavarivanja

Napon zavarivanja proporcionalan je visini električnog luka (visina električnog luka iznosi približno promjer elektrode, ili manje) prilikom zavarivanja, a kod TIG zavarivanja iznosi od 15 do 35 V. Povezan je s jačinom struje prilikom zavarivanja preko strme statičke karakteristike izvora. [2]

3. Polaritet elektrode

Bira se prema vrsti metala koji se zavaruje. Aluminij i magnezij, te njihove legure se zavaruju izmjeničnom strujom, mada se mogu zavarivati i istosmjernom strujom, elektrodom na plus polu (koja omogućuje čišćenje oksidnog sloja), ali ne tako uspješno kao s izmjeničnom strujom. Svi ostali metali se zavaruju s istosmjernom strujom, elektrodom na minus polu, čime se više grije obradak, a manje elektroda. [2]

4. Promjer volframove elektrode

Promjer elektrode se bira prema jačini električne struje, i to:

1. Elektrode iz čistog volframa mogu se opteretiti strujama jakosti blizu 50 A po milimetru promjera elektrode
2. Elektrode legirane s torijem mogu se opteretiti strujom jakosti od 60 do 80 A po milimetru promjera elektrode

Opterećenje volframove elektrode pravilnom jakosti struje, da bi imala što duži vijek trajanja i da bi bila manja onečišćenja zavarenog spoja volframom, određuje se prema izrazu:

$$I = 100 \times \varnothing \text{ elektrode} \times k, \text{ A} \quad [2]$$

\varnothing elektrode – promjer elektrode, mm

k – koeficijent opterećenja jakosti struje zavarivanja koji ovisi o vrsti elektrode (između 0,3 i 1)

Tablica 4. Prikazuje primjere koeficijenata za različite vrste elektroda. [12]

Tablica 4. Primjeri k koeficijenata za različite vrste elektroda [12]

Vrsta elektrode:	W	WT 10	WT 20	WT 30	WT 40, WZ 8, WL 10
k_{\min}	0,45	0,4	0,35	0,3	0,5
k_{\max}	0,55	0,65	0,75	0,8	1

Kod pravilno opterećene volframove elektrode formira se mala kapljica u obliku kuglice na zašiljenom vrhu elektrode, kroz koju se održava stabilan električni luk.

Kod preopterećene elektrode javlja se brže njeno trošenje, te onečišćenje zavara volframom, a prilikom premalog opterećenja elektrode javlja se nestabilan električni luk.

Prilikom mijenjanja promjera elektrode potrebno je promijeniti stezač volframove elektrode i steznu kontaktanu cjevčicu za koju je pričvršćena elektroda u pištolju.

Kod namještanja elektrode u pištolj, vrh elektrode nalazi se uobičajeno 3 do 5 mm od vrha sapnice, a ponekad i do 12 mm, ovisno o jakosti struje zavarivanja i obliku zavarenog spoja. [2]

5. Protok i vrsta zaštitnog plina

Protok plina prilikom TIG zavarivanja ovisi o: [2]

1. Vrsti materijala koji se zavaruje
2. Jakosti struje zavarivanja
3. Tehnici zavarivanja
4. Mjestu rada
5. Vrsti zaštitnog plina

Kreće se od 4 l/min do 20 l/min. Kod zavarivanja Al i Mg količina zaštitnog plina argona iznosi oko 6 l/min na 100 A, a povećanjem jakosti struje za svakih daljnjih 100 A iznosi otprilike 4 l/min više. Pri zavarivanju nehrđajućih čelika potrošnja plina je za oko 25 % manja. [2]

Potrebno je biti posebno oprezan prilikom namještanja protoka zaštitnog plina kod zavarivanja, jer prevelika količina zaštitnog plina stvara nemirno strujanje, te vrtloženje izlazećeg plina, što stvara unošenje zraka, a time i štetnih plinova u talinu zavora, što negativno utječe na mehanička svojstva zavora. Ako se pak zavaruje s premalom količinom zaštitnog plina, plin se lako otklanja s mjesta zavora, te time mjesto zavora nije dovoljno zaštićeno, što također rezultira lošim mehaničkim svojstvima zavora. [2]

Izbor vrste zaštitnog plina ovisi o materijalu koji se zavaruje, a preporučeni izbor plinova za zaštitu prilikom zavarivanja prikazan je u tablici 5. [11]

Tablica 5. Preporučeni zaštitni plinovi prilikom zavarivanja pojedinih metala [11]

Plin / materijal koji zavarujemo	Nelegirani i niskolegirani čelici	Nehrđajući čelici	Niklove legure	Bakrene legure	Aluminijske legure
Ar	x	x	x	x	x
Ar/H ₂		x	x		
Ar/He			x	x	x
He				x	x

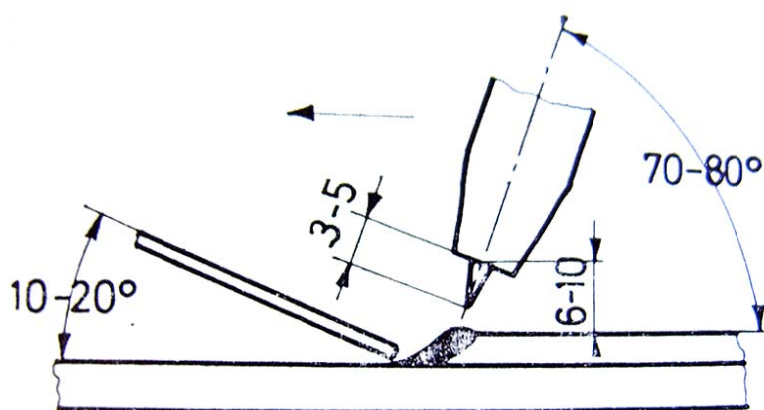
6. Brzina zavarivanja

Brzina zavarivanja kod ručnog TIG postupka iznosi od 160 do 250 mm/min [2]. Brzina zavarivanja je najpovoljnija kada je dužina taline dva do tri puta veća od promjera volframove elektrode, a kod zavarivanja u prisilnom položaju je znatno manja (jer bi u suprotnom došlo do curenja taline pod utjecajem gravitacijske sile).

Brzina zavarivanja utječe i na penetraciju, te na izgled površine zavora. [2]

7. Položaj pištolja i dodatnog materijala

Na slici 24. prikazan je položaj pištolja i dodatne žice kod ručnog TIG zavarivanja. Prikazani nagib se koristi kod svih položaja zavarivanja, a kod mehaniziranog zavarivanja je uglavnom okomitiji. Udaljenost vrha volframove elektrode koji viri izvan sapnice može biti do 5 mm, tamo gdje je nepristupačno za sapnicu, uz uvjet da oblik spoja ne dozvoljava naglo razilaženje zaštitnog plina (zavarivanje kutnog spoja ili u dubokom žlijebu). Razmak sapnice od površine taline može biti i veći od 10 mm, ovisno o jačini struje zavarivanja. [2]



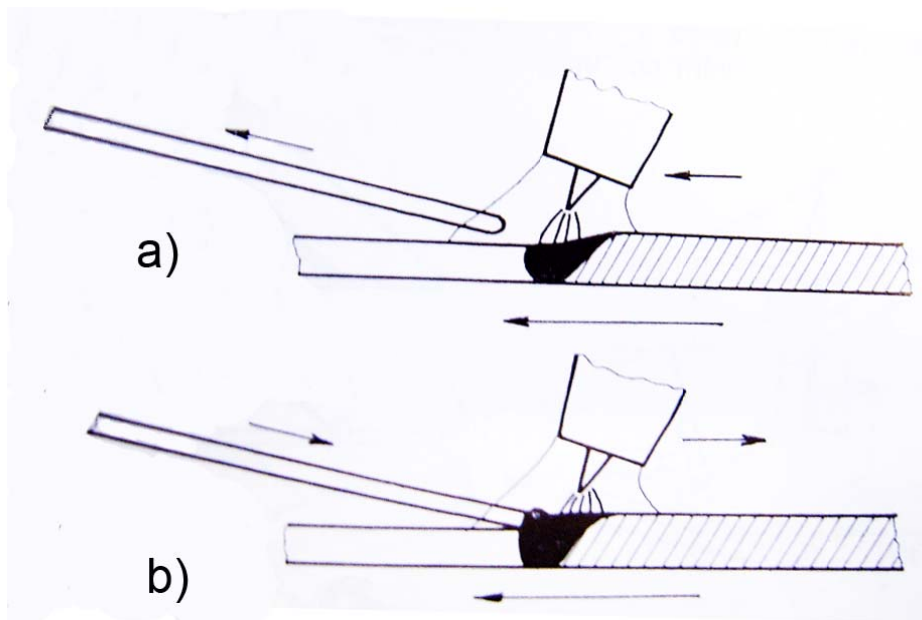
Slika 24. Položaj pištolja i dodatnog materijala kod ručnog TIG zavarivanja [2]

8. Dodavanje žice i gibanje pištolja

Dodatni materijal, koji je u obliku žice, obično se dodaje kod zavarivanja metala debljine iznad 3,2 mm. [9]

Dodavanje žice i gibanje pištolja kod TIG ručnog zavarivanja obavlja se specifičnom tehnikom, kao što je prikazano na slici 25. Žica se drži u lijevoj, a pištolj u desnoj ruci, oboje pod nagibom kao što je prikazano na slici 24. Na početnom mjestu zavarivanja uspostavi se električni luk i grije osnovni metal (radni komad) do stvaranja taline, nakon čega se pištolj povuče unatrag, ali tek toliko da toplina luka djeluje na talinu, koja treba biti dobro štićena plinom. Istodobno s povlačenjem pištolja, vrh žice se dovede (doda) u prednji rub taline, pri čemu se žica zbog topline taline i blizine električnog luka trenutno rastali. Pritom se žica povuče nazad, izvan taline i električnog luka, ali ne izvan zone djelovanja zaštitnog plina. Istodobno s povlačenjem žice iz taline kreće se s pištoljem naprijed u daljnje zagrijavanje i pretaljšivanje osnovnog metala (radnog komada) na spoju. Taj proces se ponavlja dok se zavar ne izvede do kraja.

Potrebno je obratiti pozornost da talina ne bježi ispred luka na hladni materijal, koji još nije rastaljen, jer može doći do greške u zavarenom spoju, što se vrlo često događa kod zavarivanja bakra (jer je odvođenje toplote vrlo veliko, a talina je žitka. [2]



Slika 25. Prikaz tehnike rada u dodavanju žice u talinu
kod ručnog TIG zavarivanja [2]

- a) Kod kretanja pištolja naprijed izmaknuti žicu, rastaliti osnovni materijal
- b) Povuci pištolj malo unazad, a žicu dodati na prednji rub taline

2.7. Položaji zavarivanja i vrste spojeva

Prilikom zavarivanja radni komad može biti postavljen u slijedeće položaje: [16]

1. Horizontalni
2. Horizontalno – vertikalni
3. Vertikalni
4. Nadglavni

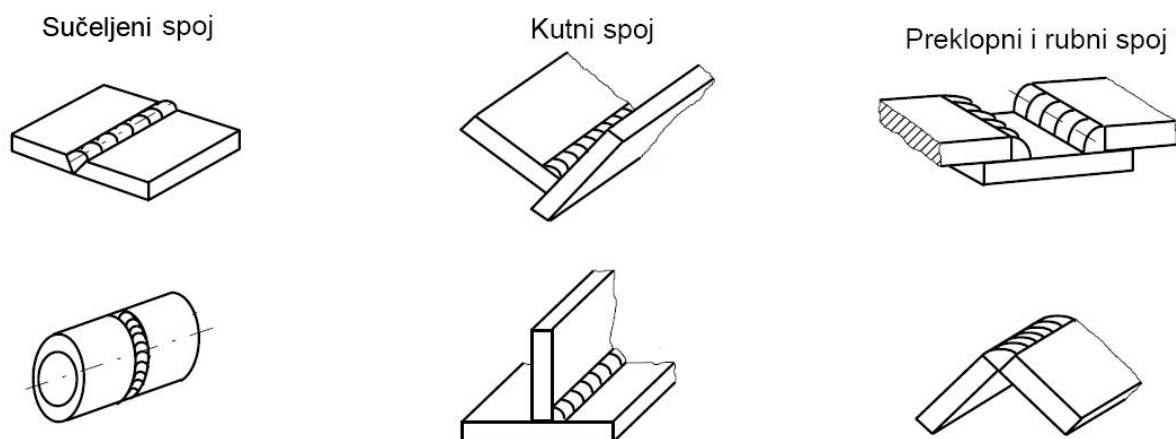
Ponekad je moguće postaviti radni komad u položaj u kojem bi zavarivaču najviše odgovaralo izvoditi zavarivanje, ali to nije uvijek moguće, npr. kod zavarivanja raznih konstrukcija mostova, građevina i sl. Najpovoljniji položaj za TIG zavarivanje je horizontalni položaj, budući da je u tom položaju najlakše upravljati i voditi talinu metala zavara.

Spojeve radnih komada koji se zavaruju moguće je podijeliti na: [16]

- Sučeljeni
- Preklopni
- Kutni
- Rubni

1. Horizontalni položaj zavara

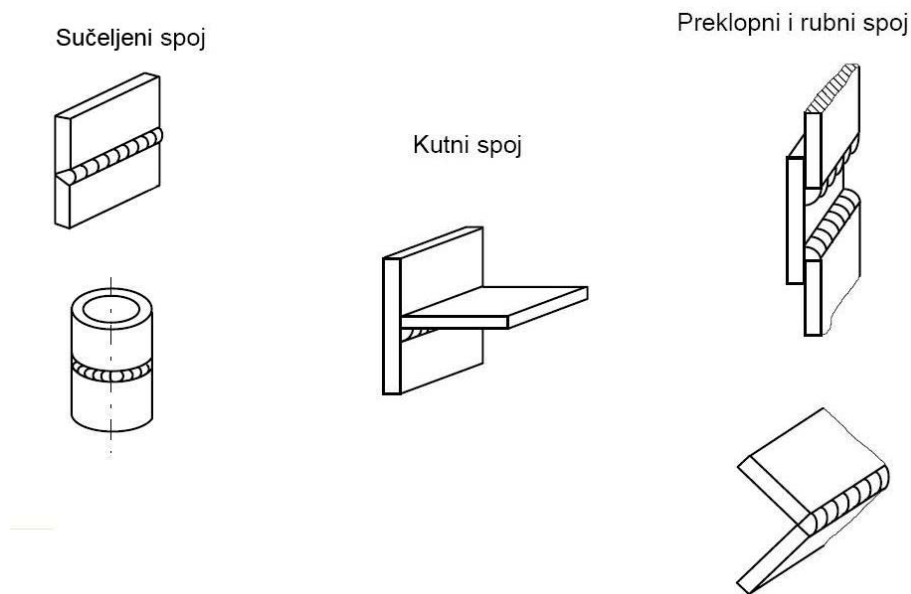
Os zavara na limu i os cijevi su horizontalni prilikom zavarivanja, a cijev se prilikom zavarivanja okreće. Slika 26. prikazuje horizontalni položaj zavara. [16]



Slika 26. Horizontalni položaji zavara [16]

2. Horizontalno - vertikalni položaj zavora

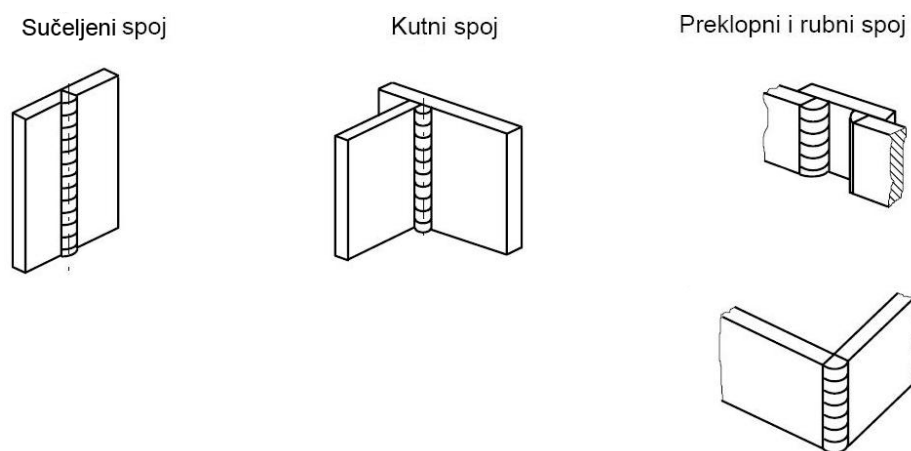
Osi zavora su horizontalne na vertikalnoj ravni prilikom zavarivanja, a cijev se prilikom zavarivanja okreće. Slika 27. prikazuje horizontalno – vertikalne položaje zavora. [16]



Slika 27. Horizontalno – vertikalni položaji zavora [16]

3. Vertikalni položaj zavora

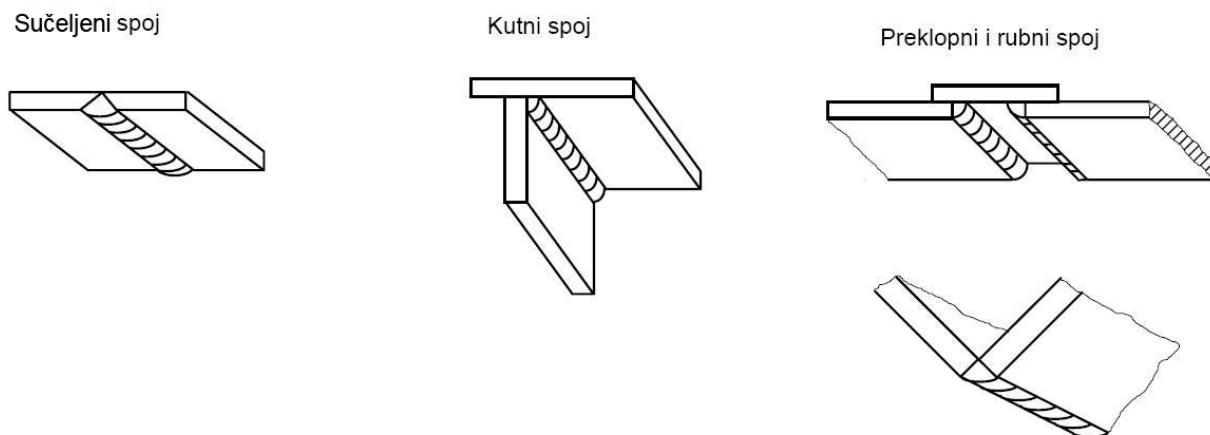
Osi zavora su vertikalne prilikom zavarivanja. Slika 28. prikazuje vertikalni položaj zavora. [16]



Slika 28. Vertikalni položaji zavora [16]

4. Nadglavni položaj zavora

Osi zavora su horizontalne prilikom zavarivanja. Slika 29. prikazuje nadglavni položaj zavora. [16]



Slika 29. Nadglavni položaji zavora [16]

2.8. Greške u zavarenom spoju

Greške u zavarenom spoju nisu poželjne i nastoje se izbjeći. Uzrokuju slabiju kvalitetu zavarenog spoja, smanjivanjem čvrstoće i homogenosti zavara. Neke od grešaka koje mogu nastati u zavarenom spoju su: [17]

1. PUKOTINE – su mjestimično razdvojen materijal u zavarenom spoju zbog loma nastalog utjecajem zavarivanja. Djelomično, ili potpuno se izbjegavaju pravilnim odabirom parametara za zavarivanje, optimalnim unosom energije, zavarenim konstrukcijama koje imaju što manju ukrućenost zavarenog spoja. Prema uzroku nastajanja dijele se na:
 - a) Tople pukotine – kod zavarivanja nastaju na visokim temperaturama tijekom hlađenja taline do čvrstog stanja. Glavni uzrok nastanka toplih pukotina je nesposobnost materijala da izdrži naprezanja u posljednjoj fazi skrućivanja kod visokih temperatura. Pojava nastanka toplih pukotina je povezana s nečistoćama u materijalu, legirnim elementima, parametrima zavarivanja i nepravilnim izborom dodatnog materijala
 - b) Hladne pukotine – nastaju nakon izvršenog zavarivanja na temperaturi ispod 300 °C. Mogu se pojaviti i nekoliko sati nakon zavarivanja. Glavni uzrok njihovog nastanka su strukture metala zavara te ZUT-a, koje su osjetljive na djelovanje vodika, prisutnost vodika u zavaru, nepovoljan položaj uključaka u zavaru.
2. ŠUPLJINE – POROZNOST – to su mjesta u zavarenom spoju ispunjena stlačenim plinom. Uzrok nastanka poroznosti mogu biti nečistoće i vlaga na mjestu zavarivanja i u dodatnom materijalu, slaba zaštita procesa zavarivanja, neispravni parametri i tehnika rada u zavarivanju. Načini sprečavanja nastanka šupljina su:
 - odmašćivanje spoja neposredno prije zavarivanja
 - za hladnijeg vremena plinskim plamenom osušiti spoj prije zavarivanja
 - pravilno uspostavljanje i prekidanje električnog luka
 - ispravna količina/protok zaštitnog plina
 - odgovarajuća čistoća zaštitnog plina
 - ispravni parametri zavarivanja
3. ČVRSTI UKLJUČCI – kao strano tijelo u zavaru može biti uključak volframa koji je dospio u zavar otkidanjem od volframove elektrode. Sprečavaju se pravilno izvođenom

tehnikom rada i pravilnim odabirom parametara zavarivanja, također je važno da se talina zavara ne dotiče vrhom volframove elektrode.

4. NALJEPLJIVANJE – je pogreška nepostojanja čvrste strukturne veze u zavarenom spoju. Najčešći uzroci naljepljivanja su nepravilna priprema spoja, nepravilni parametri zavarivanja, nepravilna tehnika rada. Sprečavaju se pravilnom pripremom spoja, pravilno odabranim parametrima zavarivanja, te tehnikom rada.
5. GREŠKA OBLIKA ZAVARA – smatra se svako odstupanje od oblika zavara. Osim što utječe na estetski izgled zavara, također utječe i na mehanička svojstva zavara.

2.9. Cr-Ni čelik

Cr-Ni čelik, ili nehrđajući čelik (eng. stainless steel) je naziv koji je u upotrebi još od početnih faza razvoja ovih čelika (početak 20. stoljeća), a označava široki raspon različitih vrsta i kvaliteta čelika otpornih na koroziju.

Obilježava ga minimalni udio kroma od 10,5 %, te dodaci ostalih legirnih elemenata poput nikla, titana, molibdena, dušika, kojima se modificira njihova struktura, ili postižu svojstva veće korozijske postojanosti, poboljšava obradivost, čvrstoća ili žilavost na sniženim temperaturama. [18]

Korozijska postojanost postoji zbog stvaranja oku nevidljivog pasivnog oksidnog filma debljine od 1 do 5 nanometara bogatog kromom. Taj pasivni oksidni film nastaje spontano, prirodnim procesima oksidacije u medijima koji sadrže dovoljnu količinu kisika na površini. Pasivni oksidni film ima i svojstvo samoobnavljanja, što znači da ako ga se skine, ili ošteti mehaničkim putem, u atmosferi s dovoljno kisika on se ponovno obnavlja i na taj način štiti metalnu površinu od nastanka korozije, što je prikazano na slici 30. [18]

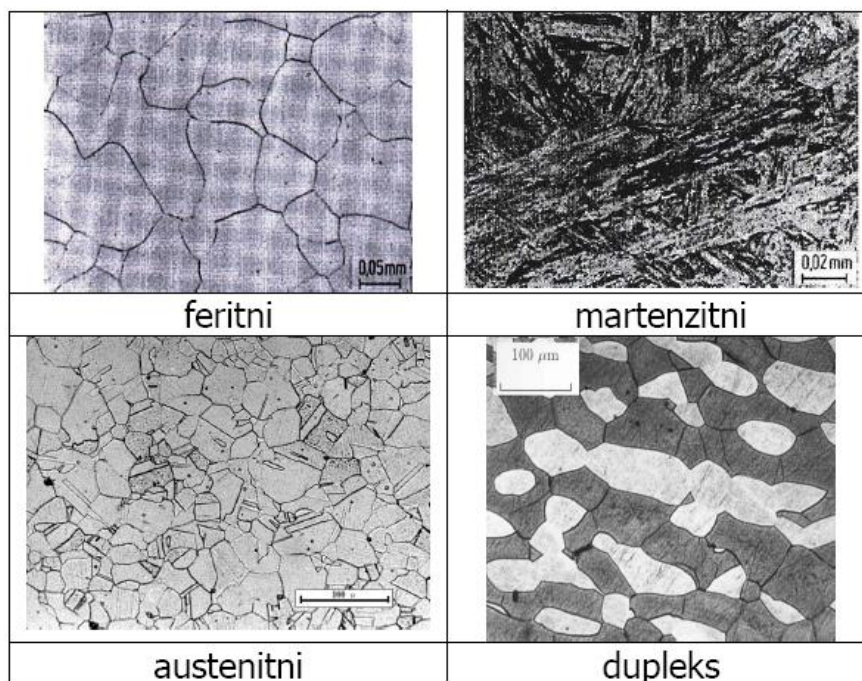


Slika 30. Prikaz mehanizma samoobnavljanja pasivnog filma kromovih oksida na površini [18]

Cr-Ni čelici se mogu podijeliti u četiri osnovne grupe:

1. Martenzitni
2. Feritni
3. Austenitni
4. Dupleks (austenitno - feritni)

Slika 31. prikazuje karakteristične mikrostrukture pojedinih grupa Cr-Ni čelika. [18]



Slika 31. Karakteristične mikrostrukture pojedinih grupa Cr-Ni čelika [18]

Martenzitni Cr-Ni čelici

Sadrže od 11 do 13 % Cr, te do 1,2 % C, te ostale elemente po potrebi (Mo, V, Ti, Al).

Karakteristike:

- feromagnetični
- mogu se očvrnuti postupcima toplinske obrade
- poboljšana vlačna čvrstoća
- poboljšana granica razvlačenja
- otpor puzanju pri povišenim temperaturama
- osjetljivost prema vodikovoj krhkosti
- loša otpornost na udarni lom kod sniženih temperatura

Zbog korozijske otpornosti i visokog sadržaja ugljika koji osigurava otpornost na trošenje koriste se za izradu kotrljajućih elemenata kugličnih ležajeva, oštrica noževa, kirurškog i zubarskog alata, turbinskih lopatica i dijelova za rad na visokim temperaturama (npr. cijevi generatora pare). [16]

Zavarljivost martenzitnih čelika

Uglavnom su manje prikladni za zavarivanje, budući da sadrže najmanje legirajućih elemenata od preostalih spomenutih vrsta Cr-Ni čelika, a i zbog većeg udjela ugljika (zavarivanje čelika s više od 0,15 % ugljika treba izbjegavati zbog mogućnosti pojave zakaljenja prilikom zavarivanja i hlađenja, tj. povećanja tvrdoće zavora pri čemu dolazi do mogućih pukotina u samome zavaru). [17]

Zavarivanje ovih čelika zahtijeva toplinsku obradu prije (predgrijavanje na 200 – 300 °C), i poslije postupka zavarivanja (popuštanje 700 – 750 °C) zbog svojstva zakaljivosti na zraku.

Za zavarivanje se koriste dodatni materijali isti ili slični osnovnom materijalu ili se koriste austenitni dodatni materijali. [18]

Feritni Cr-Ni čelici

Sadrže od 11 do 17 % Cr, te od 0,05 do 0,25 % C uz dodatak nekih drugih legiranih elemenata (Mo, Si, Al, Ti ili Nb).

Karakteristike:

- feromagnetični
- ne mogu se očvrnuti postupcima toplinske obrade jer nemaju faznu pretvorbu
- male čvrstoće
- osjetljivi na senzibilizaciju
- otpornost na koroziju i oksidaciju uz relativno nisku cijenu

Upotrebljavaju se u uvjetima izloženosti dušičnoj kiselini, u obradi voda, preradi hrane i arhitekturi, te se ugrađuju u postrojenja u kojima je otvorena opasnost od pojave napetostne korozije, a gdje ne mogu zadovoljiti austenitni čelici. [18]

Zavarljivost feritnih čelika

Ne očvršćavaju prilikom zavarivanja, pa se zbog toga lakše zavaruju. Međutim zavarljivost ovih čelika je ograničena zbog velike sklonosti prema pogrubljenju strukture, što dodatno može dovesti do ubrzanog izlučivanja krhkih intermetalnih faza (npr. sigma faza) u području visokotemperaturnog (oko 1000 °C) dijela zone utjecaja topline. [18]

Austenitni Cr-Ni čelici

Sadrže od 12 do 25 % Cr, do 0,12 % C, te 8 do 25 % Ni, te dodatke nekih drugih legirajućih elemenata (Mo, Nb, Ti, Si).

Karakteristike:

- nemagnetični
- dobre korozijske postojanosti
- dobre obradljivosti
- odlične zavarljivosti, mehaničkih svojstava, te estetskih karakteristika
- najčešće korištena vrsta nehrđajućih čelika
- nisu skloni povećanju zrna u ZUT-u, budući da imaju povećani udio kroma
- postoji mogućnost pojave senzibilizacije prilikom zavarivanja, što može imati za posljedicu pojavu interkristalne korozije (korozija na granicama zrna), a ona se sprječava odabirom stabiliziranih čelika niskog sadržaja ugljika

Upotrebljavaju se u svim granama industrije, građevinarstvu, za izradu različitih upotrebnih i ukrasnih predmeta.

Osnovni austenitni nehrđajući čelik je ANSI 304, ili 18-8. To je legura na osnovi željeza koja sadrži minimalno 18 % Cr i 8,5 % Ni, uključujući manje količine C, N, Mn i Si. [18]

Zavarljivost austenitnih čelika

Lako se zavaruju, te ih ne treba predgrijavati prije zavarivanja. Najveći problem predstavlja mogućnost senzibilizacije, tj. precipitacijskih kromovih karbida u temperaturnom rasponu od 425 do 580 °C što može dovesti do pojave interkristalne korozije [18]. Također treba obratiti pozornost na povećanu sklonost ovih čelika prema deformacijama, pošto imaju visoki koeficijent toplinske istezljivosti, te sniženi koeficijent toplinske vodljivosti. Skloni su pojavi toplih pukotina u metalu zavara što se javlja s jedne strane kao posljedica nečistoća u materijalu, te uslijed izražene sklonosti deformacijama odnosno zaostalim naprezanjima. Problem je danas uglavnom riješen pravilnim odabirom dodatnih materijala (4-12 % delta ferita), te odabirom pravilnih parametara zavarivanja. [18]

Dupleks Cr-Ni čelici

Sadrže od 22 do 27 % Cr, do 0,15 % C, te 4 do 8 % Ni, te dodatke nekih drugih legirajućih elemenata (Mo, N, Cu), a imaju austenitno – feritnu strukturu (otprilike 50 % austenita i isto toliko ferita) pri čemu je ideja dobiti dobra svojstva jednih i drugih.

Karakteristike:

- visoke čvrstoće
- dobre korozijske postojanosti (naročito prema napetosnoj koroziji)
- prihvatljiva zavarljivost
- u nekim slučajevima se može pojaviti struktura martenzita prilikom zavarivanja

Upotrebljavaju se uglavnom u rafinerijskim postrojenjima. [18]

Zavarljivost dupleks čelika

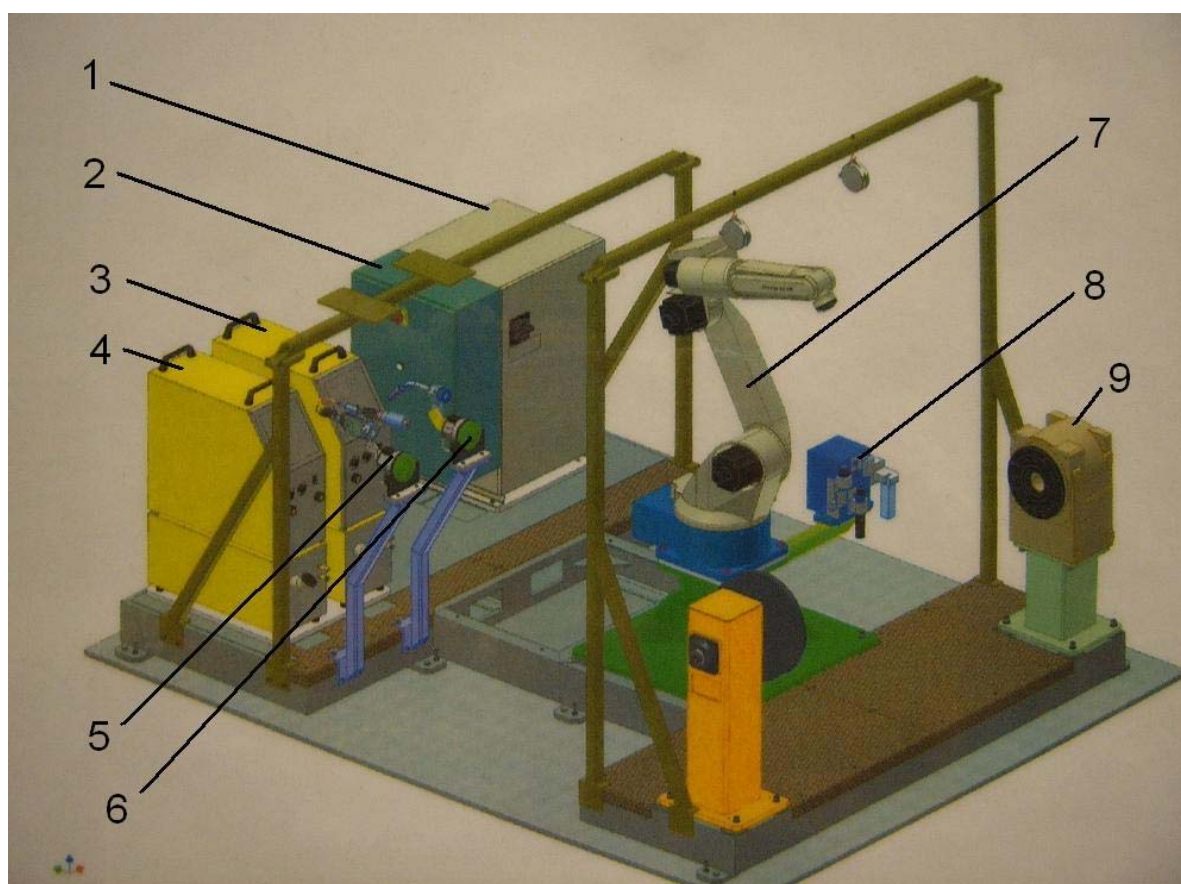
Za zadržavanje dovoljnog udjela austenitne strukture u području zavarenog spoja koriste se dodatni materijali predviđeni za zavarivanje dupleks čelika, a koji su “prelegirani” s nekoliko postotaka nikla u odnosu na dodatni materijal. U posljednje vrijeme dobiveni su mnogi rezultati u izučavanju utjecaja zaštitnih plinova kod zavarivanja dupleks čelika. Utvrđen je pozitivan utjecaj na stvaranje austenitne strukture, ukoliko se u zaštitni plin dodaje dušik. Feritizacija koja je posljedica zavarivanja, u svakom slučaju djeluje štetno, jer povećani udjel feritne strukture (≥ 80 %) neminovno dovodi do olakšanog stvaranja krhkih struktura u tom pojasu, te do smanjenja korozijske postojanosti. Feritizirani dio strukture je najkritičnije područje zavarenog spoja od dupleks čelika. Zavarivanje je nužno izvoditi u kontroliranim uvjetima u smislu unosa topline – parametara zavarivanja. [18]

3. Eksperimentalni dio

U eksperimentalnom dijelu provedeno je robotizirano i automatizirano TIG navarivanje ploče debljine 5 mm od visokolegiranog Cr-Ni čelika ANSI 304 kontinuiranim i impulsnim strujama. Navarivanje je provedeno na četiri ploče koje su bile izrezane na plazma rezaču Vanad, te je na svakoj ploči navareno šest navara, tri s kontinuiranim strujama, a tri s impulsnim strujama. Na svakoj od četiri ploče provedeno je navarivanje s drugom vrstom plina, odnosno drugom vrstom plinske mješavine.

Eksperimentalni dio rada proveden je u Laboratoriju katedre za zavarene konstrukcije Fakulteta strojarstva i brodogradnje.

Slika 32. prikazuje robotsku stanicu VRC-1G MIG + 1G TIG/1dm na kojoj je bio izveden eksperimentalni dio kontinuiranim strujama. [6]

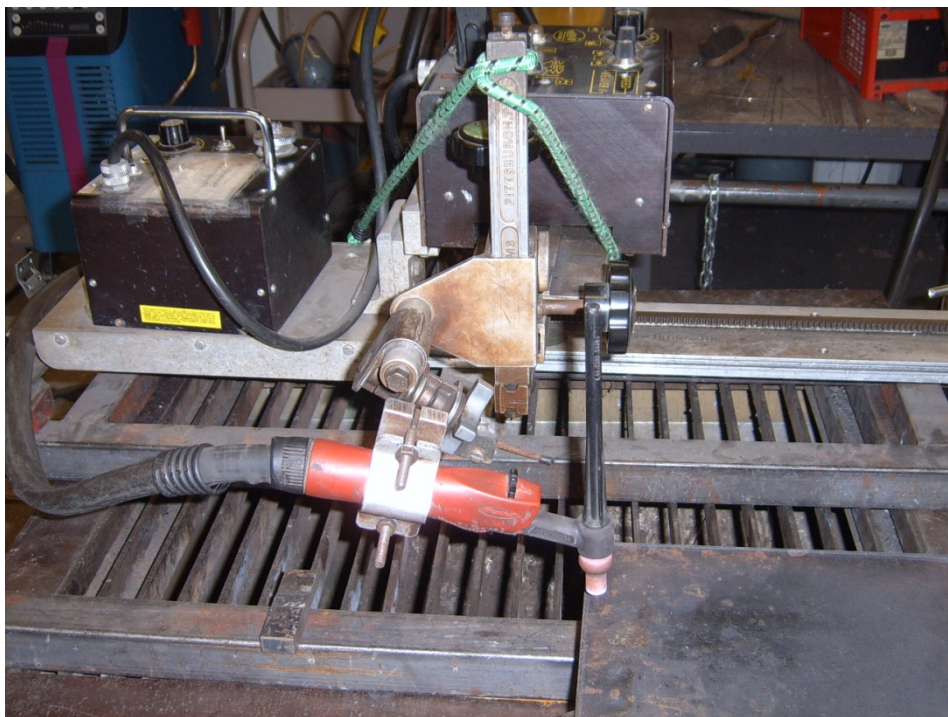


Slika 32. Robotska stanica VRC-1G MIG + 1G TIG/1dm [6]

Robotska stanica (slika 33.) sastoji se od:

1. Električne jedinice;
2. Upravljačke jedinice;
3. Izvora struje MIG/MAG VPS 4000 (Varstroj);
4. Izvora struje TIG VARTIG 3500 DC/AC (Varstroj);
5. Pištolja za TIG zavarivanje;
6. Pištolja za MIG/MAG zavarivanje;
7. Robota OTC Almega AX-V6;
8. Uređaja za čišćenje sapnice, rezanje žice i nanošenje sredstva protiv naljepljivanja kapljica;
9. Pozicionera P250V ROBO.

Slika 33. prikazuje uređaj za automatizirano TIG zavarivanje Bug-o na kojem je bio izveden eksperimentalni dio impulsnim strujama.



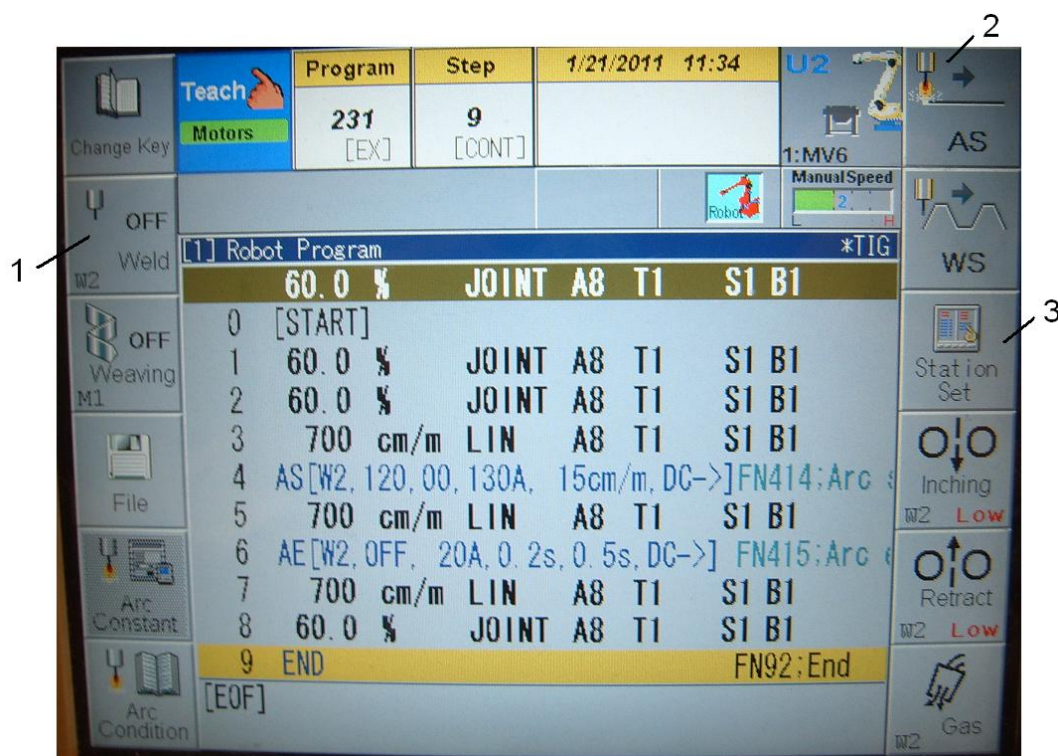
Slika 33. Uređaj za automatizirano TIG zavarivanje Bug-o

Uređaj za automatizirano TIG zavarivanje koristi digitalni izvor struje MagicWave 2200, proizvođača Fronius.

Prilikom navarivanja korištena je elektroda WT20, sapnica pištolja za zavarivanje je bila unutarnjeg promjera 7,5 mm, udaljenost od vrha elektrode do ruba sapnice je bila 2,4 mm, a udaljenost vrha elektrode do radnog komada prilikom navarivanja je bila 2,4 mm.

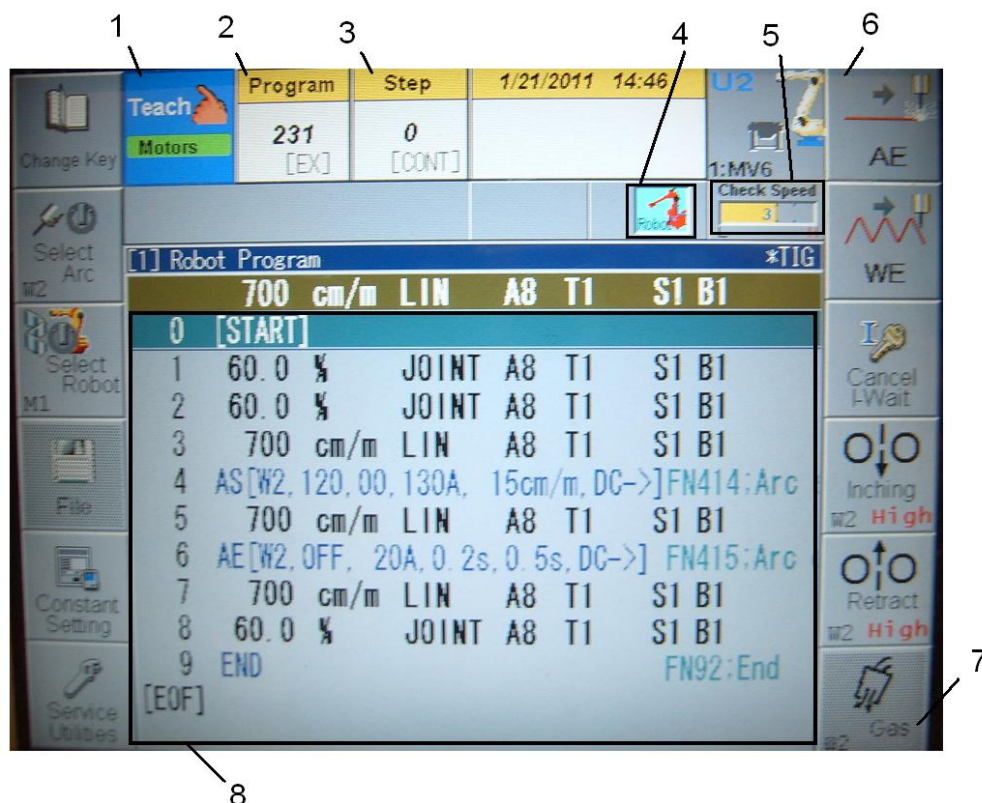
3.1. Izrada programa za robotizirano zavarivanje

Prije izvedbe navarivanja bilo je potrebno izraditi program za robotizirano navarivanje. Program je izrađen u programskom software-u samog robota za zavarivanje, a pomoću privjeska za učenje. Korištena je on-line metoda programiranja. U programu su također definirani parametri za navarivanje (jakost struje zavarivanja i brzina zavarivanja). Na slikama 34., 35., 36. i 37. je prikazano sučelje koje je korišteno prilikom programiranja robota, te parametri koje je moguće mijenjati prilikom programiranja robota.



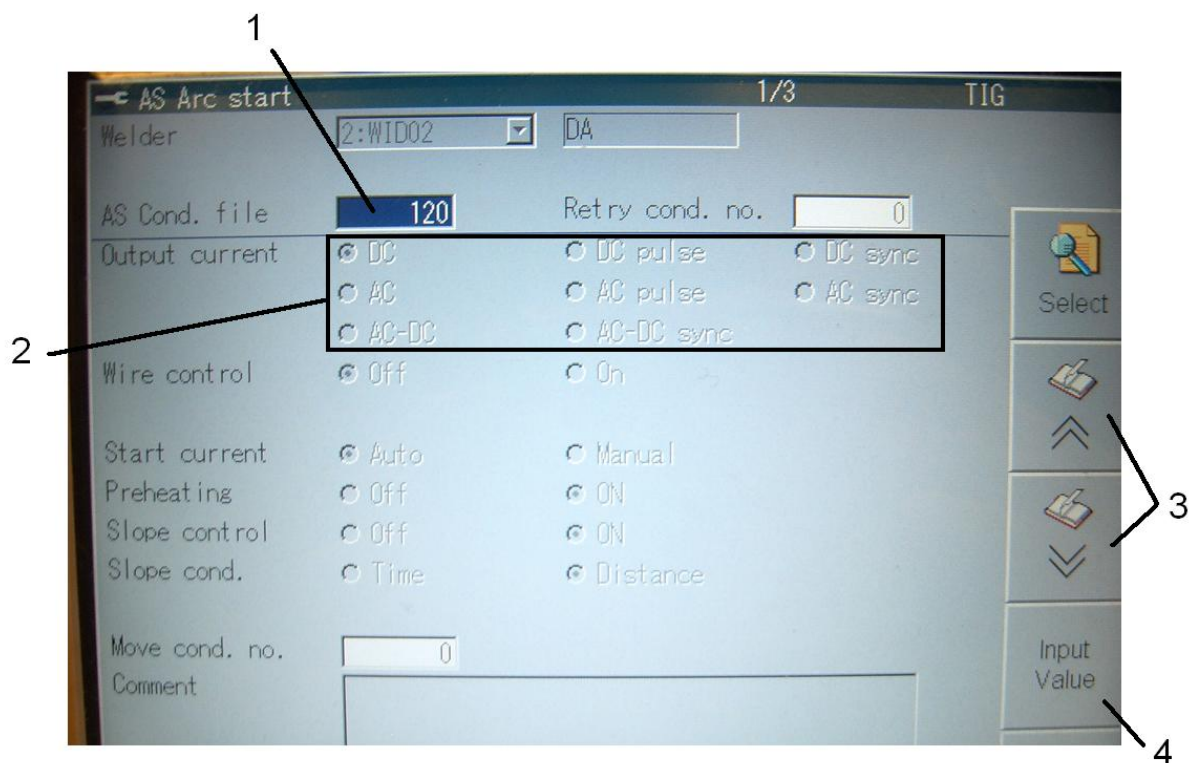
Slika 34. Program za navarivanje sa standardnim opcijama

- 1 – opcija izvođenja programa s ili bez uspostave električnog luka;
- 2 – naredba za uspostavu električnog luka;
- 3 – slanje željenog programa u upravljačku jedinicu.



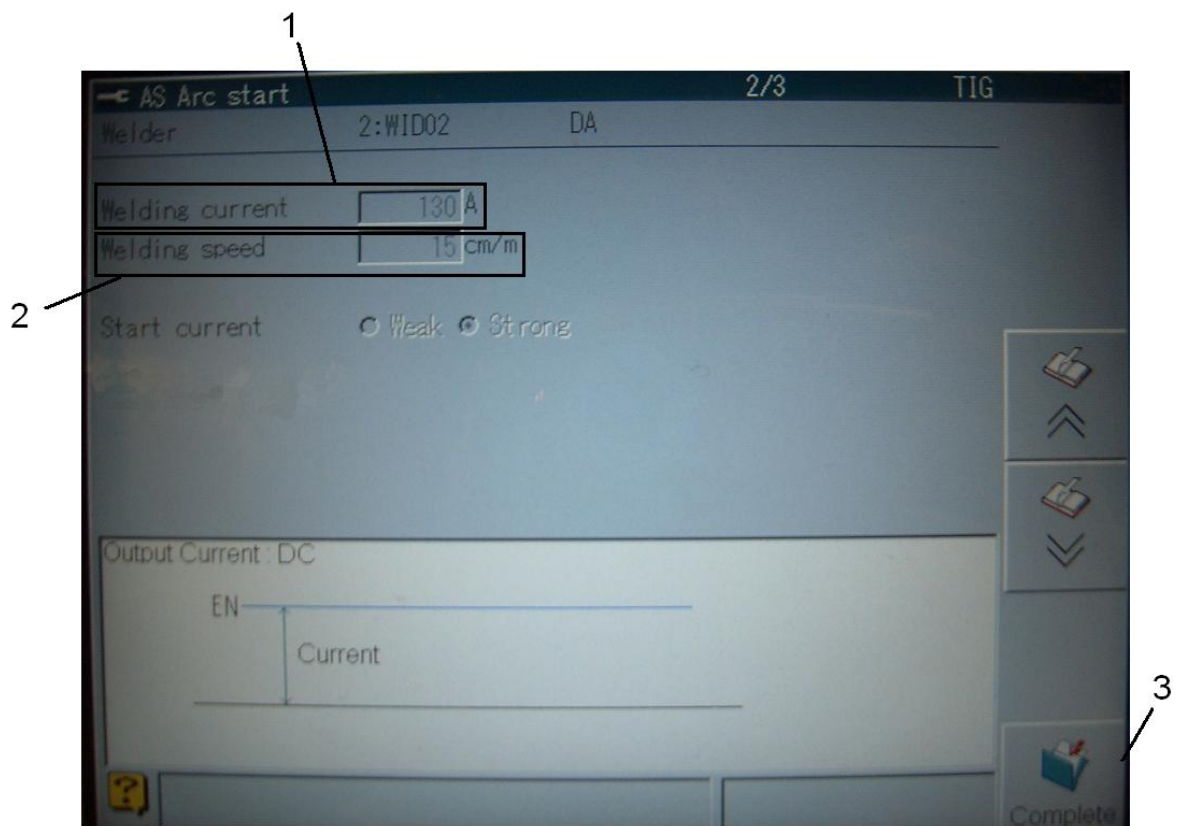
Slika 35. Program za navarivanje s dodatnim opcijama

- 1 – uključeni su motori robota za zavarivanje;
- 2 – broj programa trenutno u upotrebi;
- 3 – korak u programu u kojem se trenutno nalazimo;
- 4 – korištena interpolacija (moguće je mijenjati, gibanja prilaska i odlaska radnom komadu; izvode se u joint interpolaciji, a u neposrednoj blizini radnog komada preporučeno je da se upotrebljava linearna interpolacija);
- 5 – brzina gibanja vrha pištolja prilikom programiranja (poželjno je da prilikom približavanja radnom komadu ona bude što manja, da ne bi došlo do kolizije vrha pištolja za zavarivanje s radnim komadom, te oštećenja);
- 6 – naredba za prekid električnog luka;
- 7 – naredba za propuhivanje plina kroz sustav za dovod plina, od plinskih boca, kroz crijeva do izlaza iz sapnice pištolja za zavarivanje (ovu opciju je posebno poželjno koristiti nakon što dođe do zamjene vrste plina za zaštitu prilikom zavarivanja, da se iz sustava za dovod plina ispuše plin koji je bio prije u sustavu).



Slika 36. Biranje parametara za zavarivanje

- 1 – izbor postojeće ili kreiranje nove datoteke s parametrima za zavarivanje (nova datoteka se kreira tako da se upiše broj koji nije zauzet od strane već postojeće datoteke);
- 2 – opcija odabira vrste struje za zavarivanje (istosmjerna, izmjenična, pulsirajuća, i njihove kombinacije);
- 3 – tipke za mijenjanje stranica na kojima birmo pojedine parametre;
- 4 – odabir novih parametara za zavarivanje.



Slika 37. Biranje parametara za zavarivanje (stranica 2.)

- 1 – izbor jakosti struje za zavarivanje, A;
- 2 – izbor brzine zavarivanja, cm/min;
- 3 – potvrda i izlaz iz izbornika za izbor parametara.

3.2. Navarivanje ploča

Navarivanje je provedeno na četiri ploče od visokolegiranog austenitnog Cr-Ni čelika ANSI 304, dimenzija prikazanih u tablici 6.

Tablica 6. Dimenzije ploča koje su korištene u ispitivanju

Duljina, mm	Širina, mm	Debljina, mm
200	110	5

Navarivanje na svakoj ploči je izvedeno u horizontalnom položaju (PA). Prilikom navarivanja kontinuiranim strujama korišten je robot za zavarivanje, a prilikom navarivanja impulsnim strujama korišten je automatizirani uređaj za zavarivanje. Nakon izvođenja svakog prolaza navara, ploča je hlađena na zraku. Kada je ploča postigla temperaturu okoline, svaki navar na ploči je bio označen flomasterom.


Oznake ploča s izvedenim navarima su podijeljene u tablice, a objašnjenja oznaka su prikazana u tablici 7.

Tablica 7. Objašnjenja oznaka ploča

Oznaka ploče	Objašnjenje
K1	Navarivanje ploče 1 kontinuiranim strujama. Zaštitni plin argon.
I1	Navarivanje ploče 1 impulsnim strujama. Zaštitni plin argon.
K2	Navarivanje ploče 2 kontinuiranim strujama. Zaštitni plin mješavina argona i 2,5 % vodika.
I2	Navarivanje ploče 2 impulsnim strujama. Zaštitni plin mješavina argona i 2,5 % vodika.
K3	Navarivanje ploče 3 kontinuiranim strujama. Zaštitni plin mješavina argona i 5 % vodika.
I3	Navarivanje ploče 3 impulsnim strujama. Zaštitni plin mješavina argona i 5 % vodika.
K4	Navarivanje ploče 4 kontinuiranim strujama. Zaštitni plin mješavina argona i 7,5 % vodika.
I4	Navarivanje ploče 4 impulsnim strujama. Zaštitni plin mješavina argona i 7,5 % vodika.


Tablica 8. prikazuje parametre navarivanja i izgled navara na ploči 1. Zaštitni plin argon (oznaka K1).

Tablica 8. Ploča K1, parametri TIG navarivanja, te izgled navara

					
Broj navara	I (A)	U (V)	v_z (cm/min)	Q (l/min)	Vrsta plina
1.	50	9,3	15	9,5	Ar
2.	90	10,9	15	9,5	Ar
3.	130	12,1	15	9,5	Ar


Tablica 9. prikazuje parametre navarivanja i izgled navara na ploči 1. Zaštitni plin argon (oznaka I1).

Tablica 9. Ploča I1, parametri TIG navarivanja, te izgled navara

						
Broj navara	I (A)	U (V)	v_z (cm/min)	Q (l/min)	Vrsta plina	f (Hz)
1.	50	11	15	9,5	Ar	5
2.	90	11,6	15	9,5	Ar	5
3.	130	13	15	9,5	Ar	5


Tablica 10. prikazuje parametre navarivanja i izgled navara na ploči 2. Zaštitni plin mješavina argona i 2,5 % vodika (oznaka K2).

Tablica 10. Ploča K2, parametri TIG navarivanja, te izgled navara

					
Broj navara	I (A)	U (V)	v_z (cm/min)	Q (l/min)	Vrsta plina
1.	50	10,9	15	9,5	Ar + 2,5 % H ₂
2.	90	11,3	15	9,5	Ar + 2,5 % H ₂
3.	130	12	15	9,5	Ar + 2,5 % H ₂

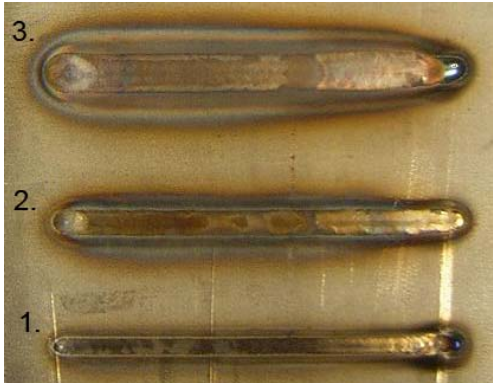
Tablica 11. prikazuje parametre navarivanja i izgled navara na ploči 2. Zaštitni plin mješavina argona i 2,5 % vodika (oznaka I2).

Tablica 11. Ploča I2, parametri TIG navarivanja, te izgled navara

						
Broj navara	I (A)	U (V)	v_z (cm/min)	Q (l/min)	Vrsta plina	f (Hz)
1.	50	13,2	15	9,5	Ar + 2,5 % H ₂	5
2.	90	13,4	15	9,5	Ar + 2,5 % H ₂	5
3.	130	14	15	9,5	Ar + 2,5 % H ₂	5

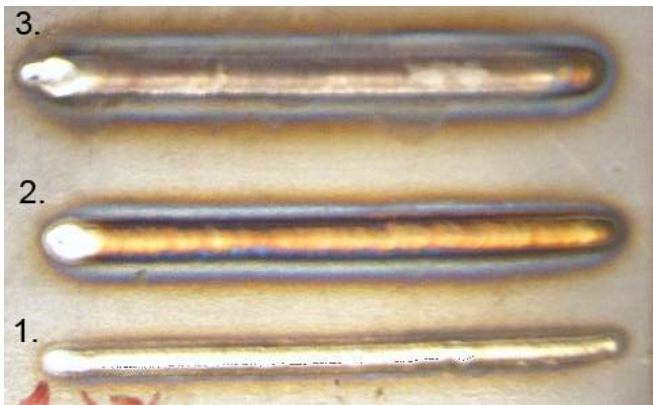
Tablica 12. prikazuje parametre navarivanja i izgled navara na ploči 3. Zaštitni plin mješavina argona i 5 % vodika (oznaka K3).

Tablica 12. Ploča K3, parametri TIG navarivanja, te izgled navara

					
Broj navara	I (A)	U (V)	v_z (cm/min)	Q (l/min)	Vrsta plina
1.	50	11,3	15	9,5	Ar + 5 % H ₂
2.	90	11,7	15	9,5	Ar + 5 % H ₂
3.	130	13	15	9,5	Ar + 5 % H ₂


Tablica 13. prikazuje parametre navarivanja i izgled navara na ploči 3. Zaštitni plin mješavina argona i 5 % vodika (oznaka I3).

Tablica 13. Ploča I3, parametri TIG navarivanja, te izgled navara

						
Broj navara	I (A)	U (V)	v_z (cm/min)	Q (l/min)	Vrsta plina	f (Hz)
1.	50	15	15	9,5	Ar + 5 % H ₂	5
2.	90	15,2	15	9,5	Ar + 5 % H ₂	5
3.	130	15,5	15	9,5	Ar + 5 % H ₂	5


Tablica 14. prikazuje parametre navarivanja i izgled navara na ploči 4. Zaštitni plin mješavina argona i 7,5 % vodika (oznaka K4).

Tablica 14. Ploča K4, parametri TIG navarivanja, te izgled navara

					
Broj navara	I (A)	U (V)	v_z (cm/min)	Q (l/min)	Vrsta plina
1.	50	11,3	15	9,5	Ar + 7,5 % H ₂
2.	90	11,7	15	9,5	Ar + 7,5 % H ₂
3.	130	13	15	9,5	Ar + 7,5 % H ₂

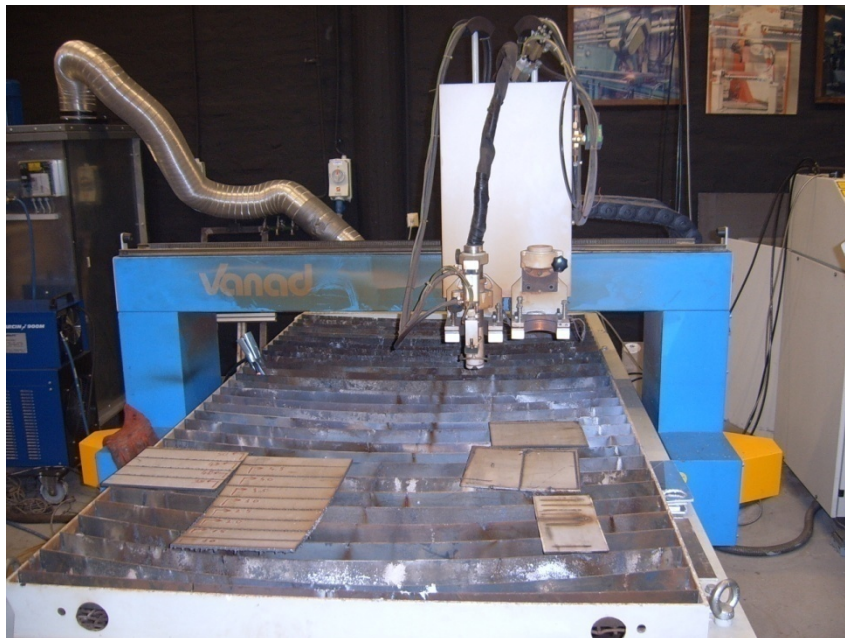
Tablica 15. prikazuje parametre navarivanja i izgled navara na ploči 4. Zaštitni plin mješavina argona i 7,5 % vodika (oznaka I4).

Tablica 15. Ploča I4, parametri TIG navarivanja, te izgled navara

						
Broj navara	I (A)	U (V)	v_z (cm/min)	Q (l/min)	Vrsta plina	f (Hz)
1.	50	15	15	9,5	Ar + 7,5 % H ₂	5
2.	90	15,2	15	9,5	Ar + 7,5 % H ₂	5
3.	130	15,5	15	9,5	Ar + 7,5 % H ₂	5

3.3. Izrada i analiza makroizbrusaka

Uzorci su rezani na plazma rezaču Vanad brzinom 2 m/min, strujom jakosti 80 A, pod tlakom zraka od 5,8 bar. Slika 38. prikazuje izrezivanje uzoraka na plazma rezaču Vanad.



Slika 38. Plazma rezač Vanad

Nakon rezanja uzoraka, bilo je potrebno izbrusiti srh i trosku na rubovima koji su nastali rezanjem. Poslije brušenja srha i troske vršeno je poravnavanje rubova, koji su kasnije brušeni na grubom brusu, te na finom brusu oznake P400.

Nakon što je brušenje dovršeno, vršilo se nagrivanje u otopini koja se sastoji od: H_2O , HCl , $CuCl_2$, $FeCl_3$ – prema Adleru. Svaki uzorak je bio uronjen u tu otopinu, te ispran destiliranom vodom (da bi se zaustavila kemijska reakcija), kasnije je ispran alkoholom i na kraju osušen na zraku.


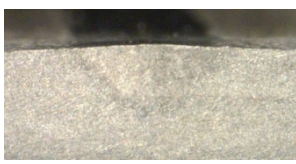
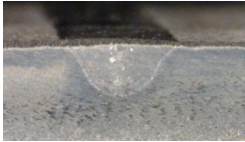
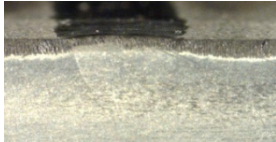
Na uzorcima je bio vidljiv navareni sloj i izgled profila navarenog sloja.

Dobiveni obrađeni uzorci su fotografirani, te su slike stavljene u tablice, radi lakšeg pregleda. Slike uzoraka grupirane su prema korištenoj struji zavarivanja (kontinuirana ili impulsna).




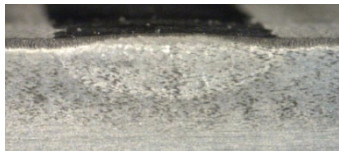
Makroizbrusci navarivani kontinuiranim strujama

Tablice 16. do 18. prikazuju makroizbruske navara izvedenih kontinuiranim strujama.

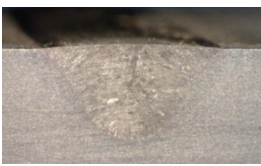
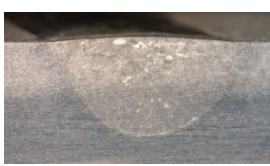


Tablica 16. Makroizbrusci navarivani kontinuiranom strujom, jakosti struje 50 A

K1.1 			K2.1 		
Zaštitni plin	Širina navara, mm	Penetracija, mm	Zaštitni plin	Širina navara, mm	Penetracija, mm
Ar	Nije uočena	Nije uočena	Ar + 2,5% H ₂	2,64	1
K3.1 			K4.1 		
Zaštitni plin	Širina navara, mm	Penetracija, mm	Zaštitni plin	Širina navara, mm	Penetracija, mm
Ar + 5% H ₂	2,6	1,33	Ar + 7,5% H ₂	2,87	1,6

Tablica 17. Makroizbrusci navarivani kontinuiranom strujom, jakosti struje 90 A

K1.2 			K2.2 		
Zaštitni plin	Širina navara, mm	Penetracija, mm	Zaštitni plin	Širina navara, mm	Penetracija, mm
Ar	3,8	1,22	Ar + 2,5% H ₂	4,2	1,9
K3.2 			K4.2 		
Zaštitni plin	Širina navara, mm	Penetracija, mm	Zaštitni plin	Širina navara, mm	Penetracija, mm
Ar + 5% H ₂	4,3	2,5	Ar + 7,5% H ₂	5,8	1,7


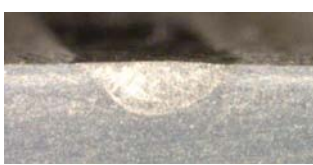

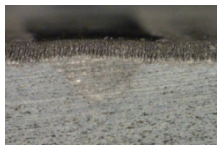
Tablica 18. Makroizbrusci navarivani kontinuiranom strujom, jakosti struje 130 A

K1.3 			K2.3 		
Zaštitni plin	Širina navara, mm	Penetracija, mm	Zaštitni plin	Širina navara, mm	Penetracija, mm
Ar	5,5	2,9	Ar + 2,5% H ₂	5,7	3
K3.3 			K4.3 		
Zaštitni plin	Širina navara, mm	Penetracija, mm	Zaštitni plin	Širina navara, mm	Penetracija, mm
Ar + 5% H ₂	5,9	3,22	Ar + 7,5% H ₂	8,35	2,27

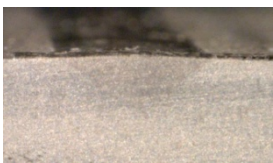



Makroizbrusci navarivani impulsnim strujama

Tablice 19. do 21. prikazuju makroizbruske navara izvedenih impulsnim strujama.


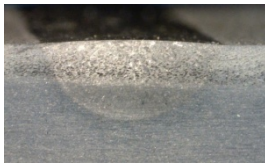

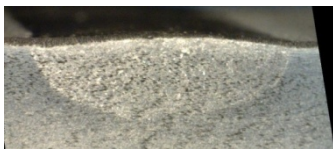
Tablica 19. Makroizbrusci navarivani impulsnom strujom, jakosti struje 50 A

I1.1 			I2.1 		
Zaštitni plin	Širina navara, mm	Penetracija, mm	Zaštitni plin	Širina navara, mm	Penetracija, mm
Ar	Nije uočena	Nije uočena	Ar + 2,5% H ₂	2	0,73
I3.1 			I4.1 		
Zaštitni plin	Širina navara, mm	Penetracija, mm	Zaštitni plin	Širina navara, mm	Penetracija, mm
Ar + 5% H ₂	1,97	0,9	Ar + 7,5% H ₂	2,4	1,2

Tablica 20. Makroizbrusci navarivani impulsnom strujom, jakosti struje 90 A

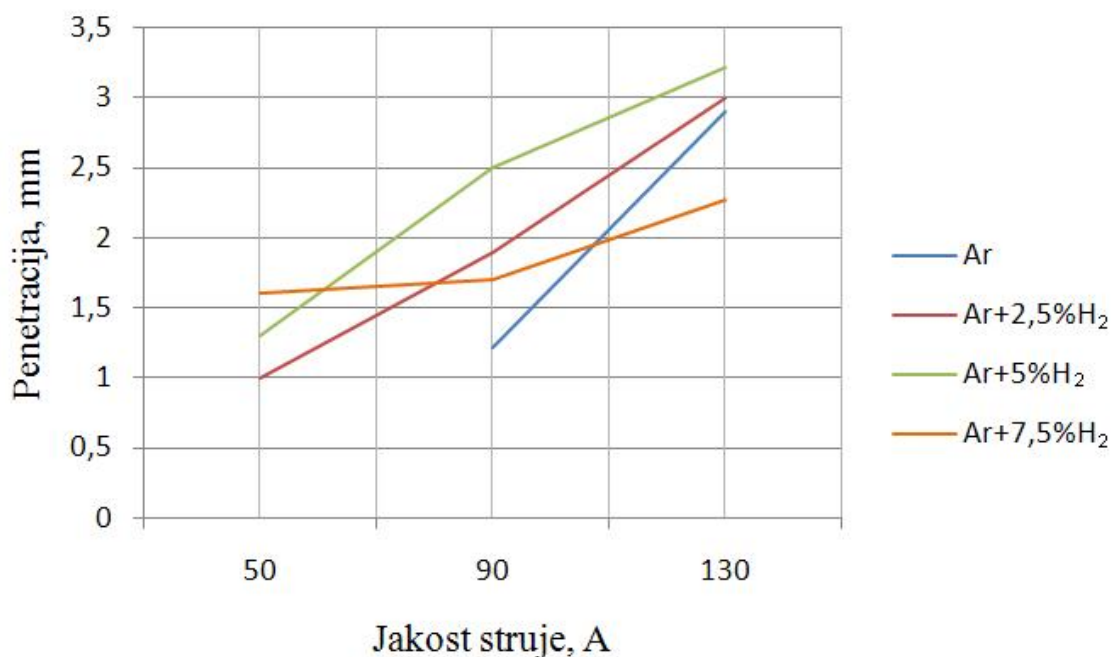
<div style="display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> I1.2  </div>			<div style="display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> I2.2  </div>		
Zaštitni plin	Širina navara, mm	Penetracija, mm	Zaštitni plin	Širina navara, mm	Penetracija, mm
Ar	2,75	0,9	Ar + 2,5% H ₂	3,8	1,7
<div style="display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> I3.2  </div>			<div style="display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> I4.2  </div>		
Zaštitni plin	Širina navara, mm	Penetracija, mm	Zaštitni plin	Širina navara, mm	Penetracija, mm
Ar + 5% H ₂	4	1,6	Ar + 7,5% H ₂	4,84	1,6

Tablica 21. Makroizbrusci navarivani impulsnom strujom, jakosti struje 130 A

<div style="display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> I1.3  </div>			<div style="display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> I2.3  </div>		
Zaštitni plin	Širina navara, mm	Penetracija, mm	Zaštitni plin	Širina navara, mm	Penetracija, mm
Ar	3,76	1,9	Ar + 2,5% H ₂	5,38	2,3
<div style="display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> I3.3  </div>			<div style="display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> I4.3  </div>		
Zaštitni plin	Širina navara, mm	Penetracija, mm	Zaštitni plin	Širina navara, mm	Penetracija, mm
Ar + 5% H ₂	5	2,57	Ar + 7,5% H ₂	6,7	2,06

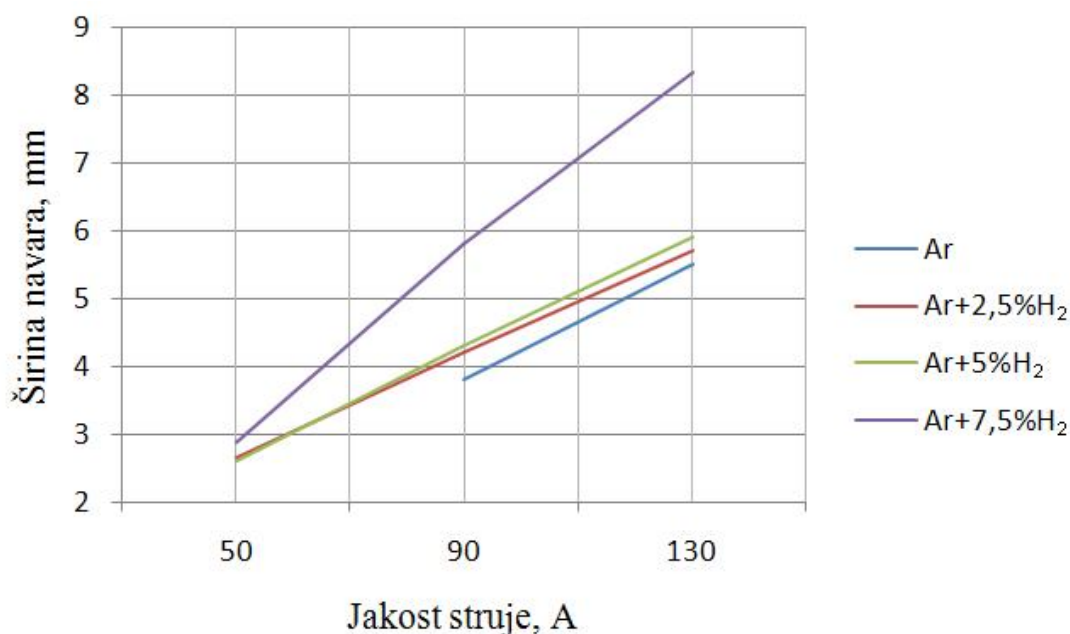
3.4. Analiza dobivenih rezultata

Na slici 39. grafički su prikazane dobivene vrijednosti penetracije navara prilikom navarivanja kontinuiranim strujama i pri korištenju različitih zaštitnih plinova. Prilikom navarivanja većim strujama, te zaštitnim mješavinama s vodikom došlo je do povećanja penetracije u odnosu na Ar. Međutim, kod upotrebe zaštitne mješavine s 7,5 % H_2 došlo je do smanjenja penetracije u odnosu na druge mješavine. Najveća penetracija je s mješavinom Ar + 5 % H_2 .



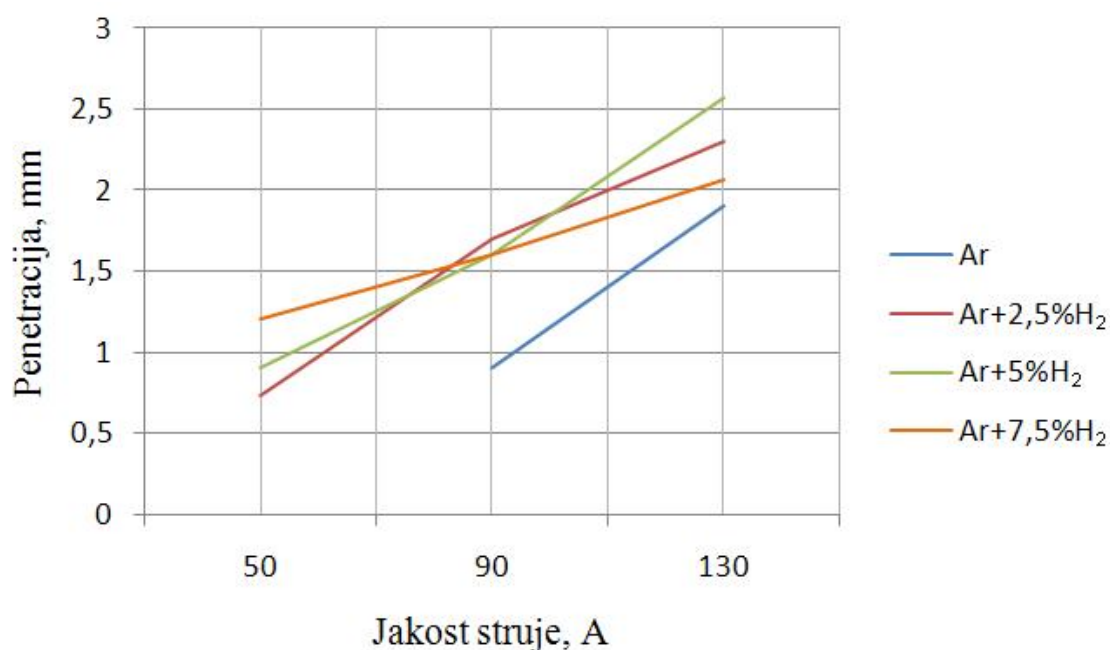
Slika 39. Utjecaj vrste zaštitnog plina na penetraciju pri navarivanju kontinuiranim strujama

Sa slike 40. je vidljivo da se širina navara kontinuirano povećava sa svim korištenim mješavinama zaštitnog plina u odnosu na argon. U slučaju korištenja zaštitne mješavine plinova argona s 7,5 % vodika došlo do značajnog povećanja širine navara u odnosu na Ar i druge upotrebljavane mješavine.



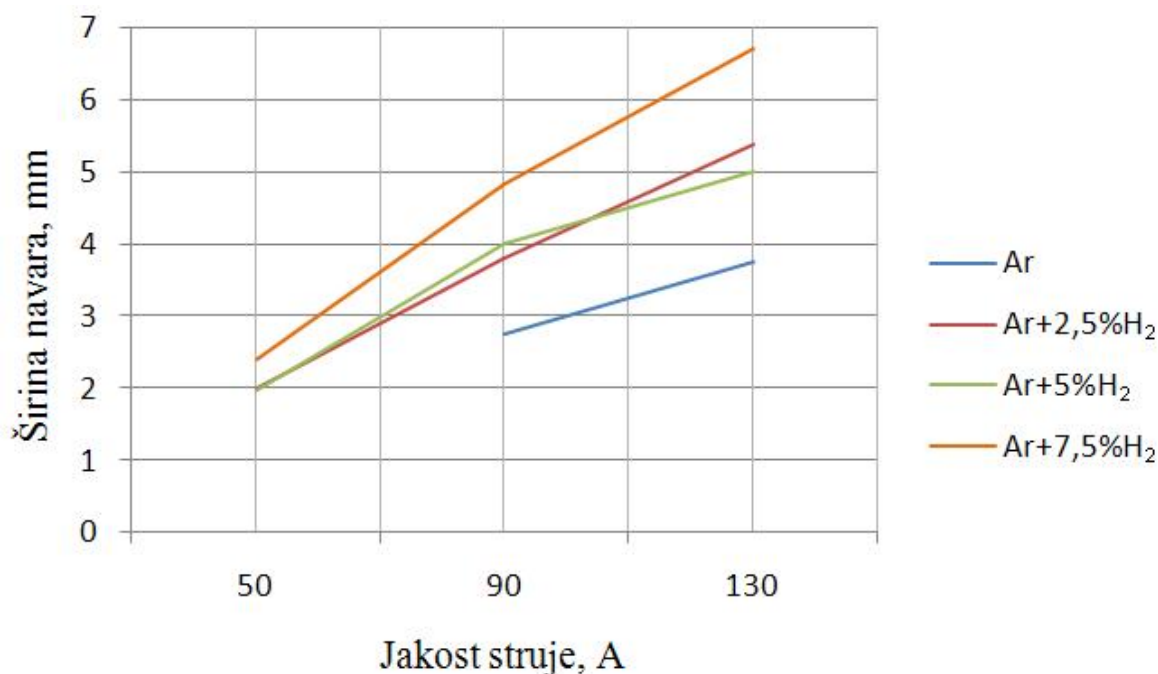
Slika 40. Utjecaj vrste zaštitnog plina na širinu navara pri navarivanju kontinuiranim strujama

Na slici 41. prikazane su dobivene vrijednosti penetracije navara prilikom navarivanja impulsnim strujama i pri korištenju različitih zaštitnih mješavina. Prilikom navarivanja većim strujama, te zaštitnim mješavinama s većim udjelom vodika penetracija je rasla. Vidljivo je također da se povećanjem udjela vodika u mješavini (do 5 %) penetracija povećava. Upotrebom mješavine s 7,5 % H₂ penetracija se pri većim strujama smanjuje u usporedbi s 2,5 % i 5 % mješavinom. Najveća penetracija postignuta je upotrebom mješavine s 5 % H₂.



Slika 41. Utjecaj vrste zaštitnog plina na penetraciju pri navarivanju impulsnim strujama

Širina navara kontinuirano raste kod navarivanja impulsnim strujama s bilo kojom vrstom plina, kao što je to vidljivo iz slike 42., a najveća širina navara je postignuta navarivanjem zaštitnom mješavinom plina s 7,5 % H_2 .



Slika 42. Utjecaj vrste zaštitnog plina na širinu navara pri navarivanju impulsnim strujama

Sa slika 40. i 42. je vidljivo da se povećanjem udjela vodika u mješavini zaštitnog plina povećava širina navara, budući da i vodik utječe na bolji prijenos energije kroz električni luk. Prilikom navarivanja impulsnim strujama širina navara je manja, budući da je unešeno manje topline.

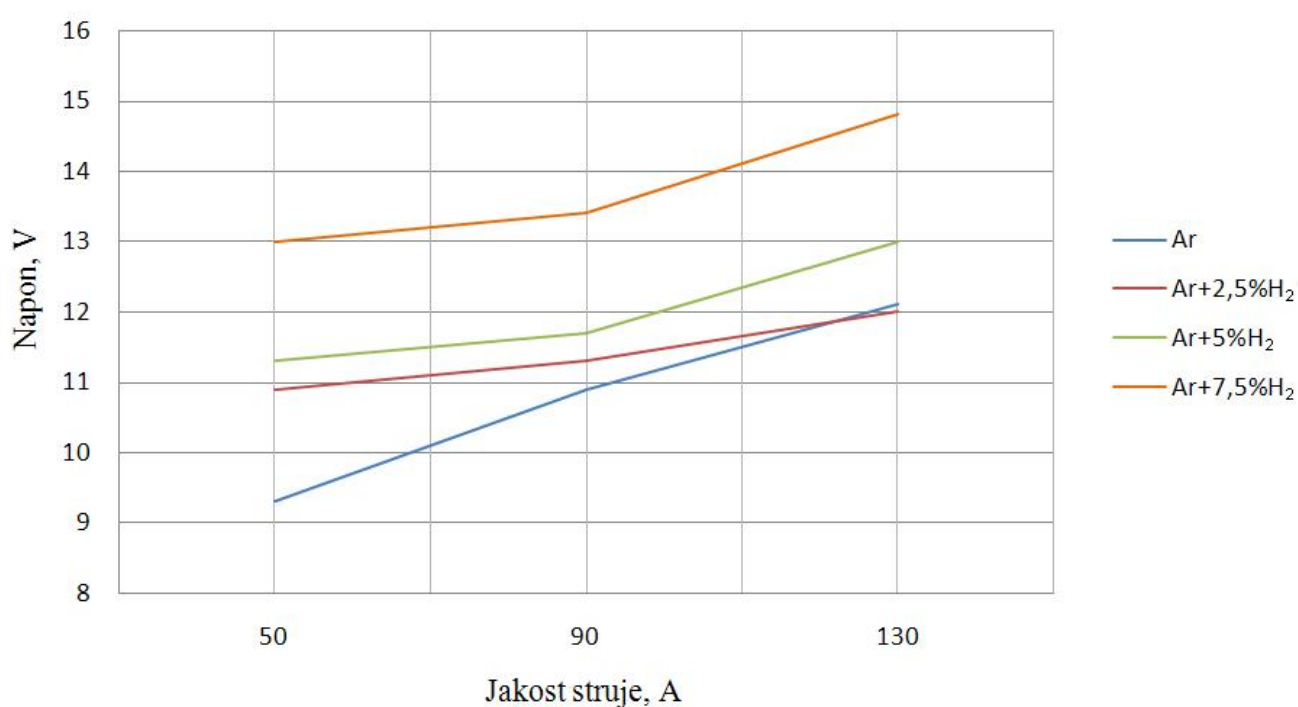
Povećanjem udjela vodika u mješavini povećava se i penetracija navara, što je vidljivo iz slika 39. i 41., međutim, samo do mješavine koja sadrži 5 % vodika. U slučaju navarivanja sa zaštitnim plinom koji se sastoji od mješavine argona i vodika, a da je vodika više od 5 %, povećanjem struje zavarivanja penetracija se smanjuje u odnosu na ostale upotrebljene mješavine zaštitnih plinova. To je vjerojatno zato jer se stabilnost električnog luka smanjuje s povećanjem udjela vodika, pa dolazi do povećanja širine električnog luka i povećanja širine navara.

Slike 43. i 44. prikazuju utjecaj zaštitnog plina na napon električnog luka pri navarivanju kontinuiranim i impulsnim strujama.

Iz slike 43. je vidljivo da se povećanjem udjela vodika u mješavini napon u električnom luku prilikom navarivanja kontinuiranim strujama povećava. To je zato što je vodik manje gustoće od argona, pa može prenijeti više energije, odnosno više topline kroz električni luk. Vodik ima i veću energiju ionizacije, koja utječe na teže paljenje električnog luka. Tablica 22. prikazuje utjecaj vrste plina na napon pri pojedinoj jakosti kontinuirane struje.

Tablica 22. Utjecaj vrste plina na napon pri pojedinoj jakosti kontinuirane struje

Vrsta plinske mješavine	Napon pri jakosti struje 50 A, V	Napon pri jakosti struje 90 A, V	Napon pri jakosti struje 130 A, V
Ar	9,3	10,9	12,1
Ar+2,5%H ₂	10,9	11,3	12
Ar+5%H ₂	11,3	11,7	13
Ar+7,5%H ₂	13	13,4	14,8



Slika 43. Utjecaj vrste zaštitnog plina na napon pri navarivanju kontinuiranim strujama

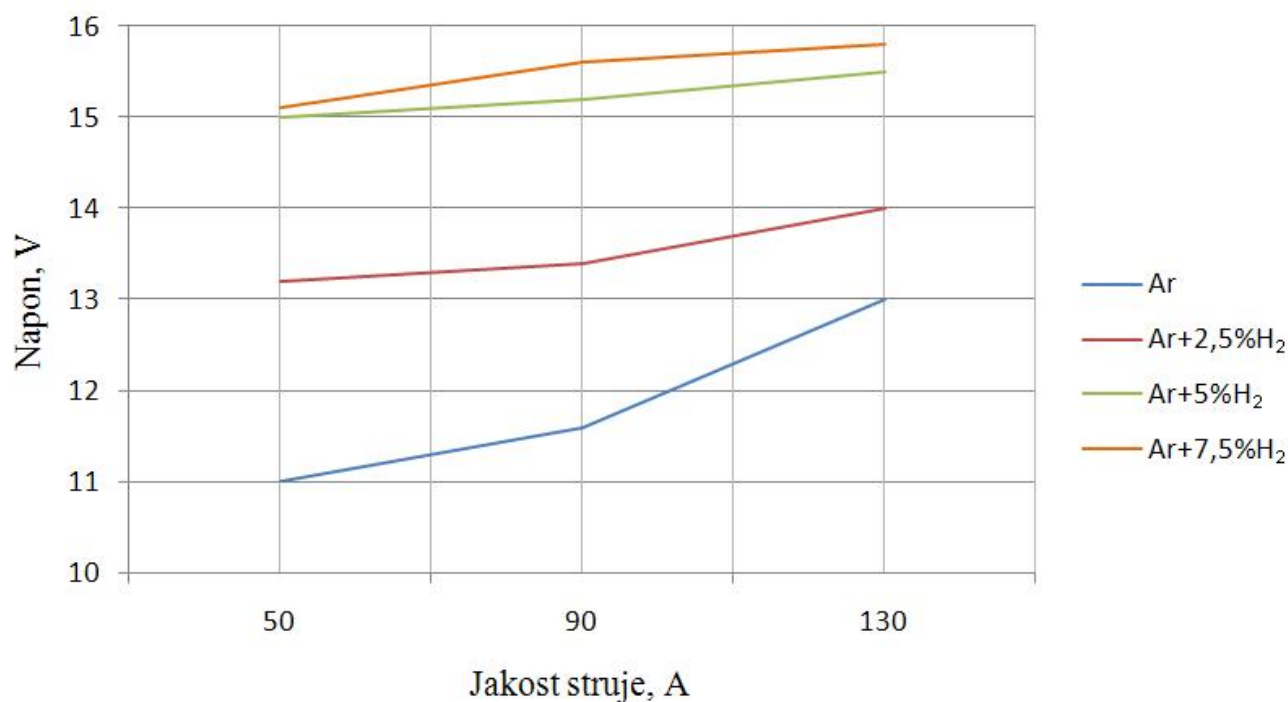
Iz slike 44. je vidljivo da se povećanjem udjela vodika u mješavini zaštitnog plina napon pri navarivanju kontinuiranim strujama povećava. Napon je značajno veći pri upotrebi zaštitnog

plina koji sadrži više od 5 % vodika u mješavini s argonom, u odnosu na napon prilikom upotrebe zaštitnog plina koji uopšte ne sadrži vodik, ili ga sadrži u količinama do 2,5 %.

Tablica 23. prikazuje utjecaj vrste plina na napon pri pojedinoj jakosti impulsne struje.

Tablica 23. Utjecaj vrste plina na napon pri pojedinoj jakosti impulsne struje

Vrsta plinske mješavine	Napon pri jakosti struje 50 A, V	Napon pri jakosti struje 90 A, V	Napon pri jakosti struje 130 A, V
Ar	11	11,6	13
Ar+2,5%H ₂	13,2	13,4	14
Ar+5%H ₂	15	15,2	15,5
Ar+7,5%H ₂	15,1	15,6	15,8



Slika 44. Utjecaj vrste zaštitnog plina na napon pri navarivanju impulsnim strujama

Područje ZUT-a na pojedinim uzorcima nije bilo moguće uočiti. Iz toga razloga se ne mogu donijeti zaključci o utjecaju određenog zaštitnog plina na širinu ZUT-a.

4. Zaključak

Zaštitni plin kod TIG zavarivanja ima izuzetno značajan utjecaj na sam tehnološki proces i kvalitetu oblika navara.

U radu je istraživao utjecaj zaštitnih plinova na geometrijska svojstva navara izvedenih TIG postupkom na ANSI 304 visokolegiranom nehrđajućem čeliku.

Provedeno je robotizirano i automatizirano TIG navarivanje kontinuiranim i impulsnim strujama s Ar i tri mješavine Ar + H₂ uz variranje jakosti struje.

Ustanovljeno je da vrsta plinske mješavine značajno utječe na geometrijske karakteristike navara, kao i na napon električnog luka. Upotrebom mješavina s vodikom dolazi do povećanja penetracije u odnosu na mješavine s Ar. Razlog za to je taj da vodik u mješavini utječe na povećanje energije električnog luka.

Međutim, kod povećanja sadržaja vodika na 7,5 %, kod većih vrijednosti struja dolazi do smanjenja penetracije u odnosu na druge upotrebljavane mješavine. Vjerojatno je to zbog toga što s povećanjem sadržaja H₂ dolazi do povećanja nestabilnosti električnog luka.

Prosječno najveće penetracije postižu se upotrebom mješavine sa 5 % H₂.

Povećanjem sadržaja H₂, u svim ispitivanim slučajevima dolazi do povećanja širine navara.

Najveća širina je postignuta upotrebom mješavine sa 7,5 % H₂.

Uzevši u obzir dobiveno, sa stanovišta utjecaja zaštitnih plinova na geometrijske karakteristike navara, moguće je zaključiti:

- Ukoliko se želi dobiti što veća penetracija kod većih struja potrebno je upotrijebiti zaštitnu plinsku mješavinu s 5 % H₂. Kod manjih struja veću penetraciju daje mješavina s 7,5 % H₂.
- Za dobivanje što veće širine navara potrebno je upotrijebiti mješavinu s 7,5 % H₂.
- Za dobivanje manje penetracije i širine navara, npr. kod zavarivanja tankih komada najbolje se pokazao zaštitni plin Ar.

5. Literatura

- [1] Živčić, M.: Tig zavarivanje – osnovne karakteristike postupka, Zavarivanje, 1985., broj 1, 39 – 45 str.
- [2] Živčić, M.: Tig zavarivanje – osnovne karakteristike postupka, Zavarivanje, 1985., broj 2, 99 – 107 str.
- [3] American Welding Society: Welding handbook – volume 2, American Welding Society, 1991.
- [4] Handbook for GTAW – Gas Tungsten Arc Welding, AWS, 1987
- [5] <http://www.industrysearch.com.au/Products/TIG-Cold-Wire-Feeder-Model-TIGer-Process-TP1002-76980>, 29.12.2010.
- [6] Varstroj katalog proizvoda, <http://www.varstroj.si>, 05.02.2011.
- [7] <http://www.everlastgenerators.com/advantages-of-tig-welding-machines.php> 29.12.2010.
- [8] <http://www.directindustry.com/prod/fronius/three-phase-inverter-dc-tig-welders-5983-470370.html>, 01.01.2011.
- [9] ASM International Handbook Committee: ASM Handbook – Welding, Brazing and Soldering, ASM International Materials park, 1993.
- [10] Grbin, M., Kovačević, B., Živčić, M.: Elektrolučno zavarivanje u zaštiti plinova, UNIMEX, d.o.o., Zagreb, 1996
- [11] TIG welding – method and application, AWS, 1992.
- [12] Crnalić, N.: Zavarivanje u zaštiti plinova netaljivom elektrodom – TIG – Glavna obilježja i područja primjene, DTZI – seminar, Pula, 2005.
- [13] Kralj S., Andrić Š.: Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka, Zagreb, 1992.
- [14] Juraga, I., Živčić, M., Gracin, M.: Reparturno zavarivanje, vlastita naklada, Zagreb, 1994.
- [15] Gojić, M.: Tehnike spajanja i razdvajanja, Metalurški fakultet Sisak, Sisak, 2008.
- [16] http://brod.sfsb.hr/kth/zavar/tii/vr_spo.pdf, 07.01.2010.
- [17] Juraga, I., Ljubić, K., Živčić, M.: Pogreške u zavarenim spojevima, HDTZ, Zagreb, 2000.
- [18] Juraga, I., Šimunović V., Stojanović I.: Zavarivanje Cr-Ni čelika, korozijska postojanost, rukovanje, DTZI – seminar, Pula, 2007.